

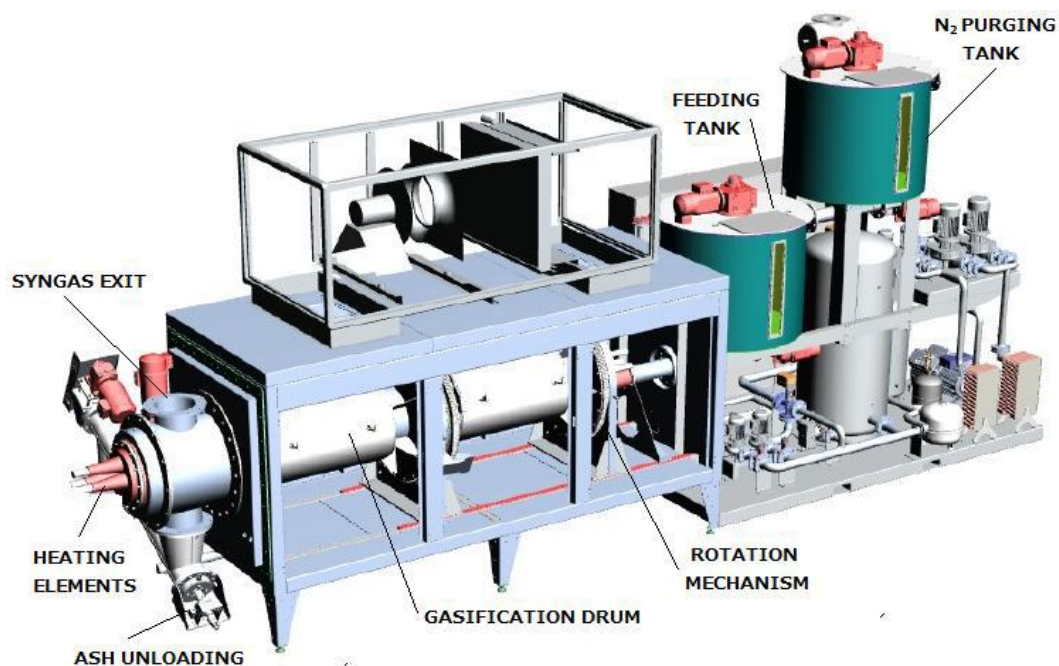


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

«Ενεργειακή αξιοποίηση βιοστερεών με την μέθοδο της αεριοποίησης»



ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΒΕΝΤΑΦΡΙΝΤΑΣ

Εξεταστική Επιτροπή

Αναπληρωτής καθ. Γκίκας Πέτρος (Επιβλέπων)

Καθ. Γιδαράκος Εύαγγελος

Καθ. Τσούτσος Θεοχάρης

Αναπληρωματικό Μέλος: Καθ. Διαμαντόπουλος Εύαγγελος

Χανιά, Μάιος 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Κ. Πέτρο Γκίκα, για την ανάθεση, την πολύτιμη βοήθεια του, καθώς και την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω πολύ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους καθηγητές Κ. Θεοχάρη Τσούτσο, Κ. Εύαγγελο Γιδαράκο, και Κ. Εύαγγελο Διαμαντόπουλο, για τη συμμετοχή και αξιολόγηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο Μάρακα Χαρίδημο, τους γονείς μου και την αδερφή μου, για την στήριξη που μου παρείχαν σε όλα τα χρόνια της ζωής μου.

Εμμανουήλ Βενταφρίντας

Χανιά, Μάιος 2017

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μελέτης, είναι να μελετήσει την ενεργειακή αξιοποίηση βιοστερεών, με τη μέθοδο της αεριοποίησης. Η μεθοδολογία της εργασίας, στηρίζεται στη συλλογή δεδομένων, από την διεθνή βιβλιογραφία, εξειδικευμένες μελέτες, καθώς και από επίσημους διαδικτυακούς τόπους.

Η εργασία ολοκληρώνεται μέσα από πέντε κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο, μελετά την ιλύ εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Αναφέρει, τα χαρακτηριστικά της ιλύος και τις μεθόδους διαχείρισής της.

Το δεύτερο κεφάλαιο, εστιάζει στη θερμική επεξεργασία στερεών απορριμμάτων. Συγκεκριμένα, αναλύει την αποτέφρωση, την πυρόλυση, την αεριοποίηση, τις τεχνολογίες πλάσματος, και μελετά επίσης τα διάφορα παραπροϊόντα που παράγονται.

Το τρίτο κεφάλαιο, εστιάζει στην αεριοποίηση. Ξεκινά με μια σύντομη ιστορική αναδρομή, περιγράφει τη διεργασία και τα προϊόντα αεριοποίησης, παραθέτει τους τύπους αεριοποίησης, και τέλος τη δυνατότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας από τεχνολογίες αεριοποίησης.

Το τέταρτο κεφάλαιο, μελετά εφαρμογές αεριοποίησης ιλύος από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, προβαίνει σε τεchnοοικονομική ανάλυση. Η παρούσα διπλωματική εργασία, μελετά, αναλύει, και παρουσιάζει ξεχωριστά τις τεχνολογίες αεριοποίησης των βιοστερεών, το κόστος κεφαλαίου, και την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά τόνο βιοστερεών (ξηρής βάσης). Το κόστος κεφαλαίου για την πρώτη μελέτη, ανέρχεται σε 5,575.000 €, με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 1440 kWh/ton. Για την δεύτερη μελέτη, το κόστος κεφαλαίου ανέρχεται σε 2,900.000 €, με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 925,7 kWh / ton, με χαμηλό κόστος παραγωγής – λειτουργίας, περίπου 0,04 € / kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Από την τρίτη μελέτη προκύπτει ότι το κόστος κεφαλαίου, ανέρχεται περίπου σε 55,751.000 €, με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος 15000 kW.

Στο τέλος της εργασίας, παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα, της μελέτης.

Summary

The purpose of this thesis, is to study the potential for energy production from biosolids, using the gasification process. The study, is based on data collected from the international literature, specialized studies, and on material collected from official websites.

The study completed through five chapters.

The first chapter, deals with sewage sludge, produced by wastewater treatment plants (WWTPs). It explores the characteristics of Sewage sludge, and the various methods of management.

The second chapter, focuses on thermal treatment of solid waste: incineration, pyrolysis, gasification, plasma technology, and deals with the various subproducts.

The third chapter focuses on gasification. It starts with a brief historical background, describes the process and the gasification products, lists the types of gasification, and the potential for energy production, using the gasification process.

The fourth chapter, focuses on the application of gasification of sewage sludge, produced by wastewater treatment plants.

The fifth and final chapter provides techno-economic analysis. In this thesis, we study, analyze, and separately present the gasification of biosolids technologies, capital costs, and the power potential per ton of dry biosolids. The capital cost of the first study is 5,575.000 €, with power potential of 1440 kWh / ton. For the second study, the capital cost is 2900.000 € producing electricity up to 925,7 kWh / ton, with low production and operating cost, approximately € 0.04 per kWh. On the third study we present that the capital cost is approximately 55,751.000 €, with potential electrical power 15000 kW.

At the end, we present the final conclusions of this study.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
SUMMARY.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο ΙΛΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	10
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΛΥΟΣ.....	11
1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΙΛΥΟΣ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ...	27
2.1 ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗ.....	27
2.2 ΠΥΡΟΛΥΣΗ.....	30
2.3 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ.....	31
2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ (ΨΥΧΡΟ-ΘΕΡΜΟ).....	33
2.4.1 ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	34
2.4.2 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	36
2.5 ΣΤΕΡΕΟ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ.....	41
3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	41
3.1.1 ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΙ.....	41
3.1.2 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΟΡΟΣΗΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΚΑΙ ΤΟΝ 1 ^ο ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΠΟΛΕΜΟ.....	42
3.1.3 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΤΟΥ ΜΕΣΟΠΟΛΕΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ	44
3.1.4 ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΤΑ ΤΟΝ 2 ^ο ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΠΟΛΕΜΟ ΜΕΧΡΙ ΚΑΙ ΣΗΜΕΡΑ	47
3.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	50
3.2.1 ΥΠΟΛΕΙΜΜΑ ΠΙΣΣΟΥΧΟΥ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ:.....	52
3.2.2 ΑΕΡΙΟ ΣΥΝΘΕΣΗΣ (SYNGAS).....	53
3.3 ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΩΝ	56

3.4 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	67
3.4.1. ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ-ΨΥΞΗ (SYNGAS).....	67
3.4.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΑΕΡΙΟ ΣΥΝΘΕΣΗΣ...	71
3.4.2.1.ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	71
3.4.2.2 ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ.....	78
3.4.2.3 ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ.....	81
3.4.2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ (SYNGAS)ΜΕ ΤΗΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ (INTEGRATED GASIFICATION COMBINED CYCLE, IGCC)	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΩΝ ΣΕ ΙΛΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ	85
4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	85
4.1.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ADELANTO C,A USA.....	85
4.1.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ Ε.Μ.Π	88
4.2 ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	91
4.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	95
5.1ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΠΕΡΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΗ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΤΥΜΠΑΝΟΥ	95
5.2 ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ..	104
5.3 ΕΡΑ (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY).....	109
5.4 ΣΥΝΟΨΗ.....	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	113
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	114
ΕΛΛΗΝΙΚΗ.....	114
ΔΙΕΘΝΗΣ	115
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ.....	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΙΛΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Η ιλύς είναι το στερεό υπόλειμμα της επεξεργασίας λυμάτων, όπου διαχωρίζεται το υγρό και στερεό κλάσμα. Το επεξεργασμένο υγρό εκρέει σε υδάτινους αποδέκτες, ενώ το στερεό συλλέγεται για περαιτέρω επεξεργασία. (Fytli & Zabaniotou, 2008).

Ορισμένα συστατικά που περιέχονται στην ιλύ, όπως οργανικό φορτίο, άζωτο, φώσφορος, κάλιο και ασβέστιο, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, μετά από κατάλληλες διεργασίες. Άλλα συστατικά, όπως τα βαρέα μέταλλα και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι ρυπαντές, που απαιτούν προσεκτική διαχείριση για να εξασφαλίζεται η ασφαλής και περιβαλλοντικά αποδεκτή διάθεση στο περιβάλλον.

Ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας των λυμάτων, διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες ιλύος:

1. Πρωτοβάθμια ιλύς: Ιλύς που συλλέγεται από τον πυθμένα της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης, σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.
2. Βιολογική ή δευτεροβάθμια ιλύς: Ιλύς που συλλέγεται από τον πυθμένα της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθίζησης, σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.
3. Μικτή ιλύς: είναι μίγμα πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος
4. Ιλύς αναερόβιας χώνευσης: Ιλύς που παράγεται, κατά την αναερόβια χώνευση των πιο πάνω ιλύων.
5. Παχυμένη ιλύς: Αφορά την πάχυνση που γίνεται, πριν το στάδιο της αφυδάτωσης. Η συγκέντρωση σε στερεά της παχυμένης ιλύος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5-9%.
6. Αφυδατωμένη ιλύς: Διεργασία δραστικής μείωσης του όγκου της ιλύος. Η συγκέντρωση σε στερεά της αφυδατωμένης ιλύος, κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 18-23% .

7. Ασβεστοποιημένη ιλύς.

1.1.1 Χαρακτηριστικά ιλύος

Η ιλύς που παράγεται από την επεξεργασία των λυμάτων, είναι συνήθως υγρή ή ημι-στερεή, με συγκέντρωση στερεών από 1,5% έως 12% κατά βάρος (Metacalf & Eddy, 1991). Η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος, επηρεάζεται κυρίως από το σχεδιασμό της επεξεργασίας των λυμάτων, και το εισερχόμενο οργανικό φορτίο του λύματος (Fytli & Zabaniotou, 2008).

Η ιλύς, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί πολύ ρευστή αν η περιεκτικότητα της σε νερό ξεπερνάει το ποσοστό του 85%, και ξηρή εφόσον η περιεκτικότητα της σε νερό δεν ξεπερνάει το 15%. Σε ποσοστό νερού 40%, χαρακτηρίζεται ως κοκκώδης ή ανθεκτικά στερεή. Σε ποσοστό 65%, χαρακτηρίζεται ως σχετικά στερεή, και σε ποσοστό 75% χυλώδης ή πλαστική.

Η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος, εξαρτάται από τα περιεχόμενα στερεά στα απόβλητα, και από τον βαθμό απόδοσης των διαφόρων σταδίων της επεξεργασίας των αποβλήτων (Τσώνης, 2004).

Τα στερεά της ιλύος τα ονομάζουμε και βιοστερεά, αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι μπορεί να αξιοποιηθούν επωφελώς (Τσώνης, 2004). Τα στερεά που συνήθως βρίσκουμε στην ιλύ, χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) Τα αιωρούμενα στερεά (SS), και β) τα διαλυμένα στερεά (DS). Για τον προσδιορισμό των στερεών της ιλύος, συνήθως χρησιμοποιείται φιλτράρισμα, με το οποίο κατακρατούνται τα αιωρούμενα στερεά, και εξάτμιση για να απομακρυνθούν τα διαλυμένα στερεά. Για περισσότερη ακρίβεια συστήνεται η χρήση φυγοκέντρωσης, για την μέτρηση της συγκέντρωσής τους. Η ιλύ από τις Δεξαμενές Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ) περιέχει 6-8% στερεά, από τα οποία το 60-80% είναι πτητικά. Η ιλύ από τις Δεξαμενές Δευτεροβάθμιας Καθίζησης (ΔΤΚ) περιέχει 0.5 έως 2.0 % στερεά, από τα οποία 70 έως 80% πτητικά (Μαρκαντωνάτος, 1990).

.

.

Τα αποτελέσματα αναλύσεων αφυδατωμένης ιλύος, από ΕΕΛ διαφόρων ελληνικών πόλεων, για την περιεκτικότητά τους σε στερεά, προέρχονται από δύο ανεξάρτητες ερευνητικές ομάδες του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και είναι τα εξής:

Παράμετρος	Andreadakis et al., 2002 (18ΕΕΛ)	Kouloumbis et al., 2000 (13ΕΕΛ)
Συνολικά στερεά %	23.21	-
Πτητικά στερεά % (εν ξηρώ)	55,33	57,45

Πίνακας 1.1.1 Αποτελέσματα αφυδατωμένης ιλύος(Πηγή: Andreadakis et al., 2002, Kouloumbis et al., 2000)

Τέλος, η ιλύς περιέχει, συστατικά με γεωργική αξία αλλά και ρυπαντές. Τα συστατικά με γεωργική αξία είναι οργανική ύλη, άζωτο, φώσφορος, κάλιο και σε μικρότερη κλίμακα ασβέστιο, θείο και μαγνήσιο. Οι ρυπαντές είναι τα βαρέα μέταλλα, οι οργανικοί ρυπαντές και τα παθογόνα (Metcalf & Eddy, 1991).

Κατηγορία ιλύος	A	B1	B2	C	D
Ξηρά Ουσία DS [kg/m ³]	12	7	9	10	30
Πτητική Ουσία (VS) [% DS]	65	67	77	72	50
P _H [%VS]	6	7	7	6.5	7
C [%VS]	51.5	52.5	53	51	49
H [%VS]	7	6	6.7	7.4	7.7
O [%VS]	35.5	33	33	33	35
N [%VS]	4.5	7.5	6.3	7.1	6.2
C/N	11.4	7.0	8.7	7.2	7.9
P [%DS]	2	2	2	2	2
Cl [%DS]	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
K [%DS]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Al [%DS]	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ca [%DS]	10	10	10	10	10
Fe [%DS]	2	2	2	2	2
Mg [%DS]	0.6	0'6	0.6	0.6	0.6
Λίπη [%DS]	18	8	10	14	10
Πρωτεΐνες [%DS]	24	36	34	30	18
Θερμική ισχύς [kWh/t DS]	4.200	4.100	4.800	4.600	3.000

Πίνακας 1.1.2 Τυπικά χαρακτηριστικά ιλύος ανάλογα με τον βαθμό επεξεργασίας(Πηγή: European Commission, DG Environment 2010)

A: Πρωτοβάθμια ιλύς.

B1: Βιολογική ιλύς (χαμηλή φόρτιση >0,20 kg BOD5/kg MLSS).

B2: Βιολογική ιλύς (υψηλή και μέση φόρτιση <0,20 kg BOD5/kg MLSS).

C: Μικτή ιλύς (πρωτοβάθμια και βιολογική).

D: Χωνεμένη ιλύς.

1.2 Μέθοδοι διαχείρισης ιλύος

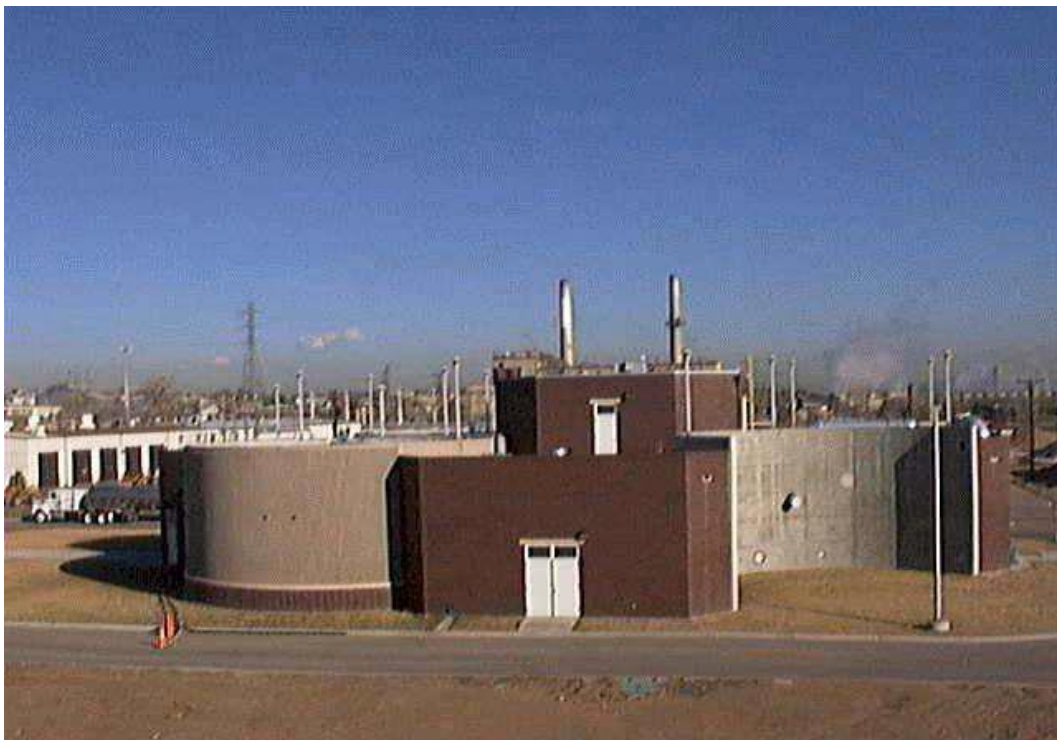
Οι σύνηθες επεξεργασίες ιλύος, σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων είναι: Η πάχυνση, η αναερόβια χώνευση που ανήκει στην διεργασία σταθεροποίησης της ιλύος, και η αφυδάτωση (Μαρκαντωνάτος,1990). Οι συγκεκριμένες διεργασίες επεξεργασίας, αναλύονται στην αρχή του συγκεκριμένου κεφαλαίου. Με τον όρο διαχείριση επιπλέον τον πιο πάνω, συμπεριλαμβάνουμε και άλλες μεθόδους διεργασιών, οι οποίες δεν είναι τόσο συνηθισμένες. Αυτές οι διεργασίες αναφέρονται, και αναλύονται στη συνέχεια.

- Προϊόντα : (Εσχάρωσης - Εξάμμωσης - Λιποσυλλογής).
- Σταθεροποίηση ιλύος: (Αερόβια χώνευση - Ασβεστοποίηση - Κομποστοποίηση).
- Ξήρανση: (Θερμικές διεργασίες – Ηλιακή - Κλίνες ξήρανσης).
- Θερμικές μέθοδοι : (Καύση-Υγρή οξείδωση - Αεριοποίηση - Πυρόλυση).
- **Πάχυνση:** Η πάχυνση είναι μια διαδικασία, που χρησιμοποιείται για τη μείωση της ογκομετρικής φόρτισης, και την αύξηση της απόδοσης κατάντη διεργασιών, επεξεργασίας των στερεών λυμάτων. Η μείωση του όγκου αποτελεί, μια σημαντική παράμετρο για την μεταφορά της ιλύος (Μαρκαντωνάτος, 1990). Οι κύριες διεργασίες για την πάχυνση της ιλύος, είναι:1) βαρυτική διεργασία, 2) διεργασία επίπλευσης,3) μηχανική διεργασία (Εικόνα 1.2), η οποία αποτελείται από την φυγοκέντρωση.



Εικόνα 1.2 Μηχανική συμπύκνωση βαρύτητας(Πηγή:<http://web.deu.edu.tr>)

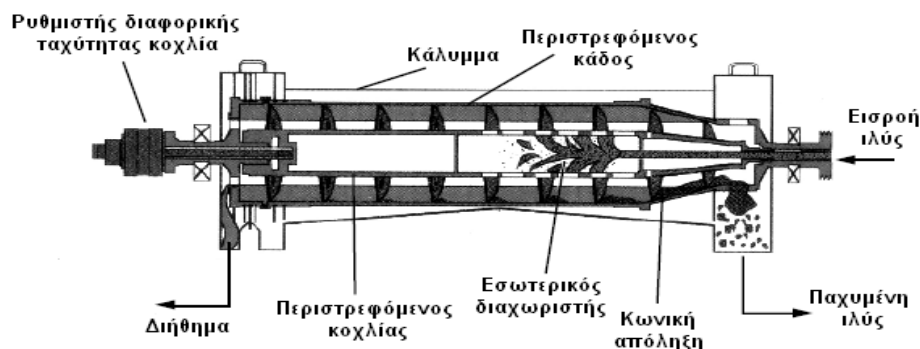
- 1) Η πάχυνση με την διεργασία της βαρύτητας, επιτυγχάνει την απομάκρυνση περίσσειας ποσότητας του υγρού από την ιλύ, με αποτέλεσμα την μείωση του όγκου της. (Metcalf & Eddy, 2003).
- 2) Η διεργασία της επίπλευσης χρησιμοποιείται, για την πάχυνση των ελαφρότερων ιλύων, που προέρχονται από την τριτοβάθμια επεξεργασία (Εικόνα 1.2.1). Το τελικό προϊόν που επιτυγχάνεται με αυτή την διεργασία, έχει υψηλότερη περιεκτικότητα στερεών από αυτή του παχυντή βαρύτητας (Turovskiy & Mathai, 2006).



Εικόνα 1.2.1 Μονάδα συμπίκνωσης με επίπλευση

(Πηγή:<http://web.deu.edu.tr>)

- 3) Η φυγοκέντρωση είναι μια μηχανική διεργασία της πάχυνσης, η οποία χρησιμοποιείται για την αφυδάτωση της ιλύος με περιορισμένη χρήση (Σχήμα 1.2) Αυτό συμβαίνει, διότι το κόστος της είναι ιδιαίτερα υψηλό (Στάμου και Βογιατζής, 1994).



Σχήμα 1.2.2 Διάγραμμα λειτουργίας κυλινδρικού παχυντή φυγοκέντρησης
(Πηγή: Μαρκαντωνάτος, 1990)

- **Αναερόβια χώνευση:** Η αναερόβια χώνευση (Εικόνα 1.2.3) αποσκοπεί στον περιορισμό, σταθεροποίηση, και στη μερική απολύμανση του όγκου της ιλύος προς επεξεργασία. Υπάρχουν δύο τύποι αναερόβιας χώνευσης: Η χαμηλής φόρτισης, και υψηλής φόρτισης. Ο λόγος που χρησιμοποιείται η αναερόβια χώνευση, σαν κύρια διεργασία σε σχέση με την αερόβια, είναι η παραγωγή βιοαερίου, το οποίο καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας, όπως η θέρμανση και η ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες ανάγκες της εγκατάστασης, όπως η μείωση των στερεών κατά 25έως40%. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την μείωση του κόστους της τελικής διάθεσης (Μαρκαντωνάτος, 1990).



Εικόνα1.2.3Αναερόβιοςχωνευτής (Πηγή: Μαρκαντωνάτος, 1990)

- **Αφυδάτωση:** Κατά την διεργασία της αφυδάτωσης όπως και της πάχυνσης, πραγματοποιείται η αφαίρεση νερού από την ιλύ, όπου αυτό φέρει ως αποτέλεσμα την μείωση του όγκου της, και την αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών. Η διαφορά μεταξύ πάχυνσης και αφυδάτωσης, βρίσκεται στο ότι η παχυμένη ιλύς διατηρεί την υγρή της κατάσταση, ενώ η αφυδατωμένη την στερεά. (Degremont,2002). Οι διεργασίες που συμπεριλαμβάνονται είναι:1) Φυσική αφυδάτωση, 2) Αφυδάτωση με μηχανικά μέσα.

- 1) Φυσική αφυδάτωση: Η διεργασία της φυσικής αφυδάτωσης επιτυγχάνεται μέσα από κλίνες ξήρανσης, δηλαδή υπαίθριους χώρους, όπου πάνω σε διαβαθμισμένο θραυστό υλικό (αμμοχάλικο) στραγγίζει η ιλύς, και ξηραίνεται μέχρι, η περιεκτικότητα των στερεών να μειωθεί σε ποσοστό από 40 έως 45%.
- 2) Αφυδάτωση με μηχανικά μέσα: Τα μηχανικά μέσα αφυδάτωσης αποτελούνται από: α) Περιστρεφόμενα τύμπανα, ή ειδικούς σάκους (συμπίεσης/στράγγισης), β) Ταινιοφιλτρόπρες, Φιλτρόπρες με πλάκες, και ειδικές διατάξεις ξήρανσης ή πρέσες μεγάλων πιέσεων. Η μηχανική υπερτερεί από τη φυσική αφυδάτωση, βασικό σημείο σύγκρισης μεταξύ φυσικής και μηχανικής αφυδάτωσης είναι η πρόκληση οσμών στις κλίνες ξήρανσης, ενώ η λειτουργία τους επηρεάζεται και από τις καιρικές συνθήκες.. (Μαρκαντωνάτος, 1990).

- **Προϊόντα : (εσχάρωσης - εξάμμωσης – λιποσυλλογής)**

Πριν την κυρίως επεξεργασία της ιλύος, απαιτείται μία προκαταρκτική προεπεξεργασία, η οποία έχει σαν σκοπό την εξασφάλιση ομοιογένειας, και σταθερής παροχής στις περαιτέρω επεξεργασίες. Η διεργασίες που επιτυγχάνονται με την προεπεξεργασία, είναι η απομάκρυνση των ευμεγέθων αιωρούμενων στερεών με σχάρες (εσχάρωση), η απομάκρυνση των κοκκωδών στερεών υλικών (άμμος, κλπ) στους αμμοσυλλέκτες (εξάμμωση),και η απομάκρυνση των επιπλεόντων υλικών όπως λίπη, και έλαια (Στάμου, 1995).

1) Κατά την διεργασία της εσχάρωσης τα προϊόντα που συγκρατούνται, είναι ογκώδη αντικείμενα όπως (κομμάτια ξύλων, πλαστικά, κλαδιά, κουρέλια κ.λπ.). Στη συνέχεια αποθηκεύονται σε κλειστούς κάδους απορριμμάτων, και απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Επίσης μπορούν να διαχωριστούν, και να χρησιμοποιηθούν για διάφορες άλλες διεργασίες, όπως η ανακύκλωση κλπ. (Στάμου, 1995).

2) Σαν τελικό προϊόν κατά την διεργασία της εξάμμωσης, συλλέγεται ένα μείγμα άμμου και λοιπών στερεών σε δοχεία. Το τελικό προϊόν μπορεί να διατεθεί σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, ή να χρησιμοποιηθεί σε δρόμους ως υλικό επίστρωσης (Αγγελάκης κ.α., 2000).

3) Κατά την διεργασία της λιποσυλλογής, τα προϊόντα λίπη και έλαια που επιπλέουν στις επιφάνειες (λωρίδες) λιποσυλλογής, οδηγούνται σε παρακείμενα φρεάτια λιπών με κατάλληλη διάταξη. Στη συνέχεια απομακρύνονται, και διατίθενται για υγειονομική ταφή, ή καίγονται σε ειδικούς καυστήρες.(Αγγελάκης κ.α., 2000).

- **Σταθεροποίηση ιλύος:(Αερόβια χώνευση- Ασβεστοποίηση- Κομποστοποίηση)**

- Η σταθεροποίηση της ιλύος, έχει ως στόχο τη μετατροπή της ιλύος σε μία κατάσταση, όπου μετριάζονται σημαντικά οι βιολογικές δράσεις ή άλλες μετατροπές που προκαλούν οσμές, καθώς και τη θανάτωση ή αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών (Τσώνης , 2004).

1) Με τον όρο αερόβια χώνευση, εννοούμε μία διαδικασία σταθεροποίησης ιλύος, στην οποία οι αερόβιες βιολογικές αντιδράσεις, καταστρέφουν τα οικοδομήσιμα βιολογικά οργανικά συστατικά της ιλύος. Γενικά, η αερόβια χώνευση χρησιμοποιείται για την επεξεργασία ιλύος χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά (Μαρκαντωνάτος, 1990).

2) Η μέθοδος της ασβεστοποίησης, συμβάλει στην μείωση των παθογόνων παραγόντων της ιλύος, αυξάνει την περιεκτικότητά της σε στερεή ύλη, και διευκολύνει τη διαχείριση του τελικού προϊόντος.(Ανδρεαδάκης κ.α., 2006). Ο ασβέστης προστίθεται στην ανεπεξέργαστη λυματολάσπη σε αρκετή ποσότητα, ώστε να αυξηθεί το pH. Το υψηλό pH, δημιουργεί ένα περιβάλλον το οποίο, δεν είναι συμβατό για την επιβίωση των μικροοργανισμών.

3) Κατά την διεργασία της κομποστοποίησης, τα οργανικά συστατικά ακολουθώντας μια πολύπλοκη διαδικασία, αποικοδομούνται κάτω από αερόβιες συνθήκες σε ένα σχετικά σταθερό τελικό προϊόν, με ταυτόχρονη παραγωγή χουμικών οξέων (Degremont,2002). Η κομποστοποίηση περιλαμβάνει τρία στάδια, στα οποία επικρατούν διαφορετικές θερμοκρασίες. Το πρώτο στάδιο είναι το μεσοφιλικό, το δεύτερο στάδιο είναι το θερμοφιλικό, και το τρίτο το κρυοφιλικό. Στο θερμοφιλικό στάδιο, τα βακτήρια φέρονται ως υπεύθυνα για την αποδόμηση των πρωτεϊνών και των λιπιδίων καθώς και για το μεγαλύτερο ποσό της παραγόμενης ενέργειας. Τέλος η κομποστοποίηση θεωρείται ολοκληρωμένη, όταν το τελικό προϊόν δεν έχει δυσάρεστη οσμή, και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί έχουν μειωθεί σε τέτοιο επίπεδο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς κίνδυνο μετάδοσης παθογόνων (Τσώνης, 2004).

▪ Ξήρανση: (θερμικές διεργασίες)

Οι διεργασίες αυτές, υπάγονται στην μέθοδο της αφυδάτωσης της ιλύος. Η διεργασία της θερμικής ξήρανσης, προϋποθέτει εφαρμογή θερμότητας για την αφαίρεση του νερού από την ιλύ. Το ποσοστό υγρασίας που επιδιώκετε ,πρέπει να είναι μικρότερο του 10% ώστε αυτό να έχει ως αποτέλεσμα ,την μείωση του όγκου της ιλύος (Hasatani et al., 2001).Υπάρχουν δύο τρόποι θερμικής ξήρανσης της ιλύος: 1) Με θερμικούς ξηραντές (Άμεσους –Έμμεσους). 2)Εξάτμιση με χρήση μη θερμικής (μη ηλιακής) ενέργειας.

2) Εξάτμιση με χρήση μη θερμικής (μη ηλιακής) ενέργειας

Η συγκεκριμένη διεργασία, πραγματοποιείται με την χρήση της θερμικής ενέργειας που προκύπτει από την καύση του βιοαερίου (Τσώνης, 2004).

Ηλιακή διεργασία ξήρανσης ιλύος

1) Η ηλιακή ξήρανση σαν διεργασία ξήρανσης, είναι μια μέθοδος που επιτυγχάνεται με θέρμανσης της ιλύος μέχρι την θερμοκρασία ξήρανσης, μέσω της εξάτμισης του νερού από την επιφάνεια της. Η διεργασία αυτή, επιτυγχάνεται σε καλυμμένες εγκαταστάσεις (Εικόνα1.2.5). Η θέρμανση της ιλύος βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο επιτυγχάνεται στις εγκαταστάσεις, και παρέχει αποτελεσματική χρήση της ηλιακής ενέργειας. Λόγω της ανάπτυξης θερμοκρασιών άνω των 50°C για μεγάλο χρονικό διάστημα, η ιλύς υγιεινοποιείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ως εδαφοβελτιωτικό. Επίσης η ξηραμένη ιλύς που παράγεται από την ηλιακή ξήρανση, παρουσιάζει μεγάλη θερμογόνο δύναμη, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε επακόλουθη θερμική αξιοποίηση. Τα θερμοκήπια, αποτελούνται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- α) Είναι ελαφριές κατασκευές από γαλβανισμένη ατσάλινη κατασκευή υποστήριξης, σε στεγανή τσιμεντένια επιφάνεια, με τοιχία στις τρεις πλευρές ύψους 1m και πλάτους 0,25m.
- β) Καλύπτονται είτε από κάλυμμα πολυμερούς υλικού είτε από γυαλί.
- γ) Είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες οι οποίοι, καταγράφουν τις παραμέτρους παρακολούθησης στο εσωτερικό και εξωτερικό τμήμα, και ρυθμίζουν την διεργασία..
- δ) Διαθέτουν ρομπότ, κινούμενο όχημα, η μηχανισμό στερεωμένο σε τοιχία του θερμοκηπίου, για την ανάδευση της ιλύος (<http://mesogeos.gr/>).



.Εικόνα 1.2.5 Εγκατάστασης ξήρανσης ιλύος με ηλιακή ενέργεια (Switzerland) (Πηγή: <http://mesogeos.gr/>)

Κλίνες ξήρανσης ιλύος

Οι κλίνες ή και (αμμοκλίνες) ξήρανσης, είναι μια από τις διεργασίες, της φυσικής μεθόδου ξήρανσης ιλύος (Εικόνα1.2.6). Συγκαταλέγεται, μεταξύ των παλαιότερων μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν, για την αφυδάτωση της χωνευμένης ιλύος, και μέχρι και σήμερα συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται σε μικρές και μεσαίες Ε.Ε.Λ (Μαρκαντωνάτος, 1990). Οι βασικοί μηχανισμοί αφυδάτωσης στις κλίνες ξήρανσης, είναι :α) Η διήθηση του υγρού στοιχείου (νερό) της ιλύος, μέσα στις κλίνες από στρώματα άμμου. Αυτή η διαδικασία διαρκεί περίπου 1 έως 3 ημέρες., και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των στερεών, από 15 έως 25% β) Η εξάτμιση του νερού, και η ξήρανση της ιλύος σε χρονικό διάστημα από 10 έως 12 ημέρες, όπου έχει ως αποτέλεσμα, την αύξηση των στερεών στην ιλύ σε ποσοστό πάνω από 40% (Στάμου, 1995).



Εικόνα 1.2.6 Κλίνες ξήρανσης (Πηγή: <http://library.tee.gr/>)

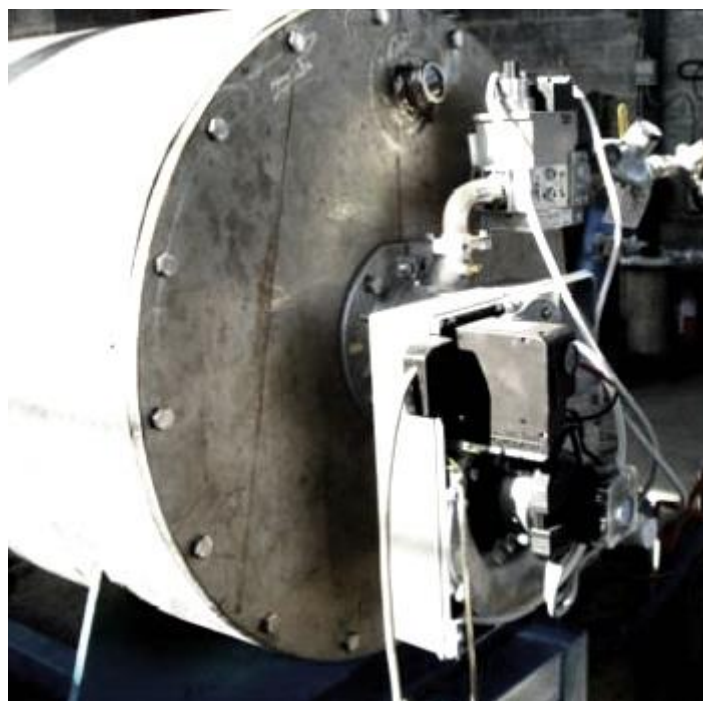
Στις κλίνες ξήρανσης, η ιλύς κατανέμεται ομοιόμορφα για την αποξήρανσή της, σε επιφάνειες ορθογωνικής κάτοψης, με διαστάσεις πλάτους μέχρι 8m, και μήκους μέχρι 20m. Τοποθετείται σε στρώμα άμμου συνήθως πάχους 10 έως 20 cm, με συντελεστή ομοιομορφίας $\Sigma.Ο.= 4,0$, δραστική διάμετρο $D=0,3-0,75\text{mm}$, και υποκείμενο στρώμα χαλικιών. επίσης, αποτελείται από ένα σύστημα αποστράγγισης, το οποίο έχει τοποθετημένους σωλήνες κάτω από τα χαλίκια, μέσω των οποίων τα στραγγίσματα επιστρέφουν στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Οι βασικοί παράγοντες σχεδιασμού κλινών ξήρανσης, είναι: α) Η φόρτιση των στερεών, και β) Τα μετεωρολογικά δεδομένα της εκάστοτε περιοχής, όπως (στοιχεία βροχόπτωσης, εξάτμισης κλπ) (Στάμου & Βογιατζής, 1994).

Θερμικές μέθοδοι : (Καύση-Υγρή οξείδωση - Αεριοποίηση - Πυρόλυση)

Καύση

Η καύση της ιλύος, είναι μια μέθοδος η οποία αποσκοπεί στην ελάττωση του όγκου της, σε υλικά μη επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία, και την εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας μέσω αυτής σε καύσιμα προϊόντα (Εικόνα 1.2.7). Ένας από τους βασικότερους στόχους της διεργασίας, είναι η μείωση του ρυπαντικού φορτίου της ιλύος. Κάποιοι από τους κύριους τρόπους επίτευξης της καύσης πραγματοποιούνται, με α) Καυστήρες πολλαπλών εστιών, και β)

Καυστήρες ρευστοποιημένης κλίνης. Η καύση πολλαπλών εστιών, πραγματοποιείται με αντίθετη ροή πολλών σταδίων, όπου τα στερεά ρέουν προς τα κάτω και τα αέρια ρέουν προς τα πάνω. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια ζώνη ξήρανσης, μια ζώνη καύσης, και μια ζώνη ψύξης. Η διεργασία καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη, αποτελείται από έναν κατακόρυφο κλίβανο, ο οποίος λειτουργεί σε θερμοκρασίες από 700 έως 800 °C, διατηρείται, σε αιώρηση με ρεύμα θερμού αέρα, όπου και εξασφαλίζει ομοιόμορφη καύση. Η διαδικασία της αποξήρανσης και της καύσης, λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα στη ζώνη της κλίνης (Werther &, Ogada 1999).



Εικόνα1.2.7 Καυστήρας ιλύος (Πηγή: <http://koutsoukos-athanasios.gr/>)

Υγρή οξείδωση

Κατά την διεργασία της υγρής οξείδωσης, η ιλύς σε υγροποιημένη μορφή έρχεται σε επαφή με ένα οξειδωτικό αέριο, όπως είναι το οξυγόνο. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε υγρό περιβάλλον, σε θερμοκρασίες από 150 έως 250 °C, και σε πιέσεις από 70 έως 150 bar (Debellement & Foussard, 1999). Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι ενεργειακά αυτόνομη, όταν το οργανικό κλάσμα του εισερχόμενου ρεύματος, έχει την απαιτούμενη οργανική περιεκτικότητα. (Perez-

Elvira et al., 2006). Η μέθοδος της υγρής οξείδωσης, μπορεί να επεξεργαστεί ιλύ με υψηλό ποσοστό μετάλλων, με προαπαιτούμενο όμως διαχωρισμό υγρών από ανόργανα συστατικά. Η διάθεση των κατάλοιπων από την οξείδωση, μπορεί να αντιμετωπιστεί με τον ίδιο τρόπο, όπως τα κατάλοιπα από την διεργασία της καύσης (Khan et al., 1999).

Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση σαν διεργασία, έχει την ικανότητα να εκμεταλλεύεται την αυξημένη υγρασία της ιλύος, χωρίς να απαιτεί δαπάνη ενέργειας για την ξήρανση της (Εικόνα 1.2.8). Η διεργασία πραγματοποιείται σε εύρος θερμοκρασιών, από 750 έως 1600 °C, με παρουσία οξειδωτικού μέσου (υπό –στοιχειομετρικού οξυγόνου, υδρατμού ή μίγματος αυτών) (Fytli & Zabaniotou, 2008). Με την αεριοποίηση της ιλύος, παράγεται ένα υψηλής ποιότητας αέριο καύσιμο (αέριο σύνθεσης/syngas), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Hamilton, 2000). Επίσης, για την χρήση της ιλύος ως καύσιμο, δεν είναι απαραίτητη η σταθεροποίηση της ιλύος, διότι η μη σταθεροποιημένη ιλύς έχει μεγαλύτερη θερμική αξία (Αγγελάκης κ.α. 2005).



Εικόνα 1.2.8 Αεριοποιητής Pyromex (Πηγή: Gikas, 2014)

Πυρόλυση

Η διεργασία της πυρόλυσης, είναι μια θερμική επεξεργασία που πραγματοποιείται, με απουσία οξυγόνου. Τα παραπροϊόντα από την διεργασία της πυρόλυσης, όπως τα στερεά υπολλείμματα, περιέχουν αδρανή υλικά, άνθρακα, και απαέρια (Εικόνα 1.2.9). Δεδομένου ότι τα προϊόντα της πυρόλυσης έχουν θερμαντική αξία, η πυρόλυση θεωρείται ως επεξεργασία, που απαιτεί την περαιτέρω αξιοποίηση των στερεών καταλοίπων και των απαερίων. Οι κύριες ενώσεις που βρίσκονται στα απαέρια είναι υδρογονάνθρακες, H_2 , CO και CO_2 .

Η σύνθεση των απαερίων εξαρτάται, από την ποιότητα της ιλύος, καθώς επίσης και από την θερμοκρασία της πυρόλυσης (Stammach et al., 1989).



Εικόνα 1.2.9 Πυρολυτής ιλύος (Πηγή: <http://www.cleansmart.cn/>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

Η θερμική επεξεργασία των στερεών απορριμμάτων, περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες μετατροπής του περιεχομένου τους, σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, με ταυτόχρονη ή συνεπακόλουθη αποδέσμευση θερμικής ενέργειας (<http://energywaste.gr>, 2014). Στη συνέχεια παρατίθενται, και αναλύονται οι κύριες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας, καθώς επίσης και οι δύο παραγόμενοι τύποι στερεών υπολειμμάτων, μέσω των θερμικών διεργασιών.

2.1 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση, ή πιο κοινά η καύση των στερεών απορριμμάτων, ουσιαστικά εκπροσωπεί μια αρκετά παλαιά και διαδεδομένη διεργασία (Σχήμα 2.1.1). Όπως αναφέρει ο Γιδαράκος (2006), η συγκεκριμένη διεργασία περιλαμβάνει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, από 500 έως 600⁰C με παρουσία φλόγας, για την οξείδωση των επιμέρους στοιχείων. Οι προϋποθέσεις για την επίτευξη πλήρους καύσης των αποβλήτων είναι (Γιδαράκος, 2006):

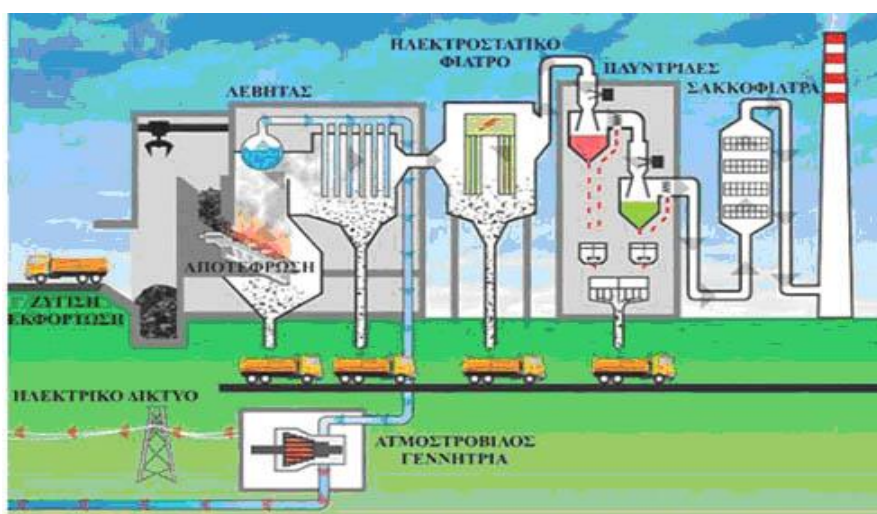
- Επαρκής ποσότητα καύσιμου υλικού και οξειδωτικού μέσου (O₂) στην εστία καύσης.
- Επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας ανάφλεξης.
- Σωστή αναλογία μίγματος (καύσιμης ύλης - οξυγόνου).
- Συνεχής απομάκρυνση των αερίων, τα οποία παράγονται κατά την καύση.
- Συνεχής απομάκρυνση των υπολειμμάτων της καύσης.

Κατά την διεργασία της καύσης, εκτός των τυπικών προϊόντων (διοξείδιο του άνθρακα, ατμός, μονοξείδιο του άνθρακα), παράγεται ανάλογα με την ποιότητα των αποβλήτων και μια σειρά άλλων ουσιών, όπως διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου, υδροχλώριο, υδροφθόριο και Πολυχλωριωμένες δι-βενζοδιοξίνες.

Όσον αφορά τις Πολυχλωριωμένες δι-βενζοδιοξίνες ,και δι-βενζοφουράνια (PCDD/PCDF), αποτελούνται και οι δύο ενώσεις από δύο χλωριωμένους δακτυλίους βενζολίου. Οι διοξίνες και τα φουράνια, είναι παρόντα στο περιβάλλον σε εξαιρετικά μικρές συγκεντρώσεις. (Τζουπάνος, & Σαμαρά, 2004).

Επίσης, κατά την καύση των αστικών στερεών αποβλήτων παραμένουν στερεά υπολείμματα, τα οποία αντιστοιχούν στο 25-40% του βάρους των εισερχομένων αποβλήτων. Η ποσότητα των υπολειμμάτων εξαρτάται, από τη σύνθεση των αποβλήτων, και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Αυτά διακρίνονται σε τέφρα, που παράγεται στο χώρο της καύσης (απομακρύνονται μετά την εσχάρα), τέφρα από τους λέβητες (υπολείμματα τα οποία δημιουργούνται στις θερμαντικές επιφάνειες των λεβήτων, και συγκεντρώνονται στις χοάνες κάτω από το λέβητα), ιπτάμενη τέφρα, και σκόνη που κατακρατείται στα φίλτρα (συγκεντρώνεται στις χοάνες κάτω από τα ηλεκτροφίλτρα ή σακκόφιλτρα), και υπολείμματα τα οποία παράγονται από τα συστήματα καθαρισμού των αερίων.. (Γιδαράκος, 2006).

Οι μονάδες αποτέφρωσης, σχεδιάζονται ώστε να επεξεργάζονται είτε σύμμεικτα απόβλητα (mass-burned incineration), είτε εναλλακτικά καύσιμα που προέρχονται από την επεξεργασία των αποβλήτων. Διαφοροποιούνται, τόσο σε σχέση με τον τύπο του συστήματος καύσης (κινούμενων εσχαρών, περιστρεφόμενου κλιβάνου, ρευστοποιημένης κλίνης), όσο και σε σχέση με το σύστημα ελέγχου της ρύπανσης. (υγρή /ξηρή επεξεργασία αερίων, σακκόφιλτρα, ηλεκτροστατικά φίλτρα, πλυντρίδες κ.α.). Για την επεξεργασία των σύμμεικτων αποβλήτων, χρησιμοποιείται το σύστημα κινούμενων εσχαρών ενώ, οι άλλοι τύποι συστημάτων καύσης χρησιμοποιούνται συνήθως για την αποτέφρωση επεξεργασμένων ρευμάτων αποβλήτων.



Σχήμα 2.1.1 Τυπική μονάδα αποτέφρωσης αστικών στερεών αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Πηγή: Γιδαράκος, 2006)

Η αποτέφρωση, αποτελεί μία ώριμη μέθοδο επεξεργασίας στερεών αποβλήτων, με πλήθος εργοστασίων να λειτουργούν στα κράτη μέλη της Ε.Ε. Λόγω των παραγόμενων αέριων εκπομπών, διέπεται από πολύ αυστηρό πλαίσιο ελέγχου, το οποίο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον. Ειδικά τα συστήματα αντιρρύπανσης, χρησιμοποιούν τεχνολογία αιχμής, και έχουν καταφέρει να περιορίσουν σημαντικά τις παραγόμενες αέριες εκπομπές τα τελευταία χρόνια. Θα πρέπει να σημειωθεί πως λειτουργούν περίπου 600 εγκαταστάσεις αποτέφρωσης αποβλήτων παγκοσμίως, και περισσότερες από 400 από αυτές βρίσκονται στην Ε.Ε. Κάποιες από αυτές είναι η Μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ: Άμστερνταμ Ολλανδία (Εικόνα 2.1.2). Μονάδες Αποτέφρωσης ΑΣΑ (Vienna) Αυστρία, όπως και άλλες μονάδες στη Γαλλία και Γερμανία και στην Brescia Ιταλία. Εκτός Ευρώπης, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Μονάδα Αποτέφρωσης στην Κίνα (<http://www.greendot.com.cy>).



Εικόνα 2.1.2 Μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ : Άμστερνταμ Ολλανδία (Πηγή: Γιδαράκος, 2006)

Όλες οι κατηγορίες υπολείμματος από τη θερμική επεξεργασία, απαιτούν προσεκτική διαχείριση. Η διάθεση σε χώρο ταφής, πρέπει να λαμβάνει υπόψη την εκπλυσιμότητα των διαφόρων συστατικών, που περιέχουν τα υπολείμματα αυτά. Η ιπτάμενη τέφρα, περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, διαλυτών αλάτων, οργανικών, και την υψηλότερη περιεκτικότητα από όλα τα κατάλοιπα σε χλωριωμένες οργανικές ενώσεις. Θεωρείται επικίνδυνο απόβλητο, και αν δεν εφαρμοστεί κάποια μέθοδος αδρανοποίησής της, θα πρέπει να διατεθεί σε χώρο διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων. Η τέφρα επίσης, μπορεί να διατεθεί μετά την ψύξη της σε ΧΥΤΑ αλλά συνήθως αξιοποιείται στην οδοποιία, καθώς στα κράτη μέλη της Ε.Ε., έχουν αναπτυχθεί εθνικές προδιαγραφές για την αξιοποίησή της, σε αντίθεση με την ελληνική πραγματικότητα.

2.2 Πυρόλυση

Η Πυρόλυση είναι η μέθοδος, κατά την οποία λαμβάνει χώρα η φυσική και χημική αποσύνθεση των θερμικά ασταθών οργανικών ουσιών, που βρίσκονται στα απόβλητα υπό την επίδραση θερμότητας, από 400 έως 800°C (Γιδαράκος, 2006).

Σε αντίθεση με την αποτέφρωση και την αεριοποίηση, πρόκειται για μια διεργασία ισχυρά ενδόθερμη, όπου απαιτείται, εξωτερική πηγή ενέργειας. Στην πραγματικότητα βέβαια, δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν συνθήκες περιβάλλοντος πλήρους απουσίας O_2 επομένως, πραγματικά πυρολυτικά συστήματα λειτουργούν με ποσότητες O_2 μικρότερες των στοιχειομετρικών.

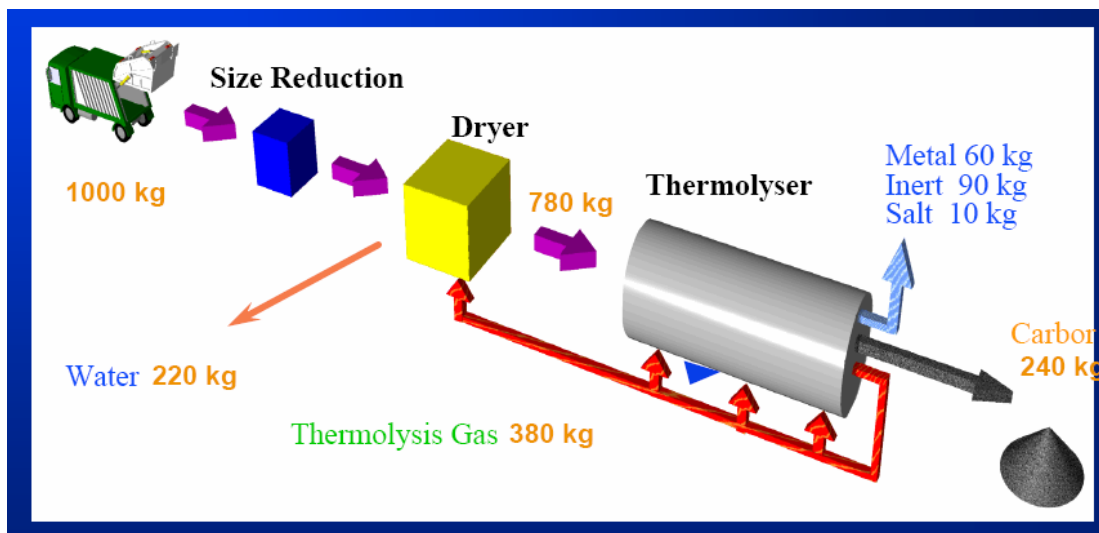
Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, αρχικά είναι κυρίως αντιδράσεις διάσπασης, όπου οργανικά συστατικά χαμηλής πτητικότητας, μετατρέπονται σε άλλα περισσότερο πτητικά:



Επίσης, στα αρχικά στάδια τις πυρόλυσης, συμβαίνουν αντιδράσεις συμπύκνωσης, αφυδρογόνωσης, και αντιδράσεις σχηματισμού δακτυλίων, που οδηγούν στο σχηματισμό ενός στερεού ανθρακούχου υπολείμματος, από οργανικές ενώσεις χαμηλής πτητικότητας:



Στη συνέχεια, λαμβάνουν χώρα και άλλες αντιδράσεις των οργανικών ρύπων. Στην περίπτωση ύπαρξης O_2 σχηματίζεται, CO και CO_2 ή είναι πιθανή η αλληλεπίδραση με H_2O . Το παραγόμενο κωκ, μπορεί να εξαερωθεί σε O_2 και CO_2 . (Γιδαράκος, 2006). Ένα ενδεικτικό ισοζύγιο μάζας απεικονίζεται στο σχήμα (2.2.1).



Σχήμα 2.2.1 Ενδεικτικό ισοζύγιο μάζας πυρολυτικής μονάδας (Πηγή: Γιδαράκος, 2006)

2.3 Αεριοποίηση

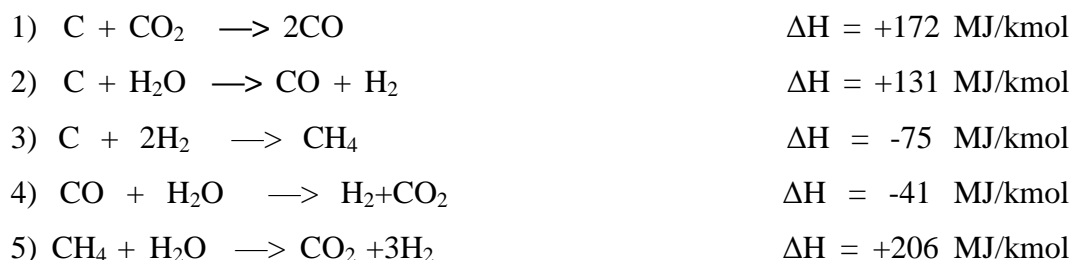
Η αεριοποίηση, είναι μία μέθοδος μετατροπής του οργανικού μέρους της πρώτης ύλης σε αέριο προϊόν, που πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσία οξειδωτικού μέσου (υπο-στοιχειομετρικού οξυγόνου ή υδρατμού ή μίγματος αυτών) (Σχήμα 2.3.1). Η θερμοκρασία αντίδρασης κυμαίνεται από 750 – 1600 °C. Η κύρια διαφοροποίηση της αεριοποίησης από την πυρόλυση, είναι η απαίτηση της παρουσίας περίσσειας υδρατμού, που οδηγεί στην πλήρη μετατροπή του περιεχομένου στην πρώτη ύλη άνθρακα σε καύσιμο αέριο. (Fytily & Zabaniotou, 2008). Η παρουσία αέρα/οξυγόνου στον χώρο του θαλάμου αεριοποίησης, οδηγεί στην παραγωγή αερίου προϊόντος με χαμηλή (4-6 MJ/nm³ θερμογόνο δύναμη (αυτόθερμη αεριοποίηση), ενώ η παρουσία περίσσειας υδρατμού οδηγεί στην παραγωγή αερίου προϊόντος με μέση (10-15 MJ/nm³) ή υψηλή (15-20 MJ/nm³) θερμογόνο δύναμη (αλλόθερμη αεριοποίηση) (Bridgewater & Evans, 1993).

Η αεριοποίηση έχει μελετηθεί εκτενώς, με πρώτη ύλη ορυκτό άνθρακα ή ξυλώδη βιομάζα, ενώ η έρευνα της αεριοποίησης στερεών απορριμμάτων ή ιλύος ,είναι σε σχετικά πρώιμο στάδιο. Τα αρχικά αποτελέσματα των ερευνών είναι ενθαρρυντικά, και για αυτόν τον λόγο είναι αναγκαία η συνέχιση της έρευνας.

Ο μεγάλος βαθμός απόδοσης σε ηλεκτρική ενέργεια η πολλαπλή χρήση του αερίου προϊόντος, αλλά και η δυνατότητα τροφοδοσίας ποικίλων πρώτων υλών, την καθιστά πολλά υποσχόμενη για την εξοικονόμηση φυσικών πόρων

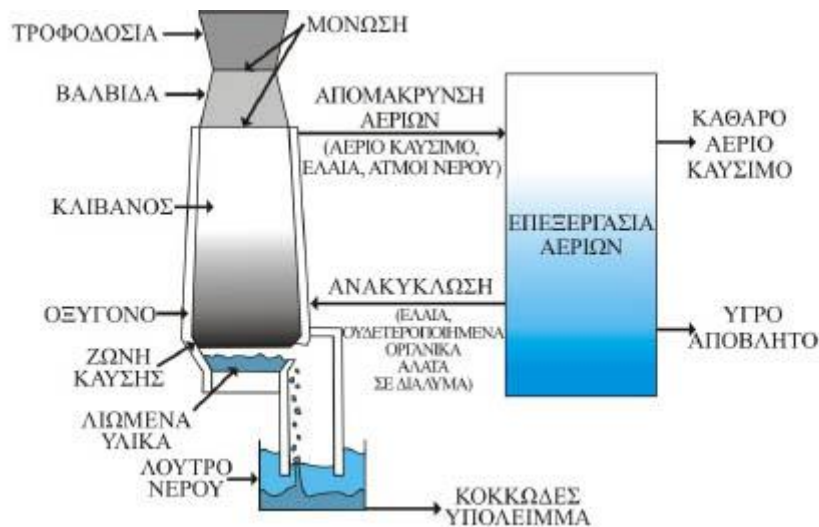
Η αεριοποίηση έχει ομοιότητες με την πυρόλυση, όπως τη μετατροπή των απορριμμάτων σε αέρια, στερεά και υγρά καύσιμα,με την διαφορά ότι παράγονται σημαντικά μικρές ποσότητες υγρών σε σχέση με την πυρόλυση,και κυρίως μικρές ποσότητες πίσσας. Όμως, παρουσιάζει και μία βασική διαφορά κατά την εφαρμογή της, αφού η μεν πυρόλυση, χρησιμοποιεί εξωτερική πηγή θερμότητας για να ενεργοποιηθούν οι ενδόθερμες αντιδράσεις θερμικής διάσπασης των απορριμμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Η αεριοποίηση είναι αυτοσυντηρούμενη (χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας μετά το στάδιο της ανάφλεξης), και χρησιμοποιεί πρόσθετο καύσιμο αέριο, όπως για παράδειγμα ατμό, μονοξείδιο του άνθρακα, αέρα ή οξυγόνο, για την επιπλέον μετατροπή των οργανικών υπολειμμάτων σε αέρια προϊόντα. Η ενέργεια που απαιτείται για την αντίδραση αεριοποίησης, παράγεται συνήθως με καύση μέρους του οργανικού υλικού στον αντιδραστήρα αεριοποίησης.

Τα κύρια προϊόντα της αεριοποίησης, είναι το υδρογόνο, το μονοξείδιο του άνθρακα. Μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και κάποιοι υδρογονάνθρακες, παράγονται σε σχετικά μικρότερη ποσότητα. Οι κύριες αντιδράσεις που πραγματοποιούνται, κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης είναι (Gikas & Stedman, 2011):



Τα τελικά προϊόντα της αεριοποίησης είναι:

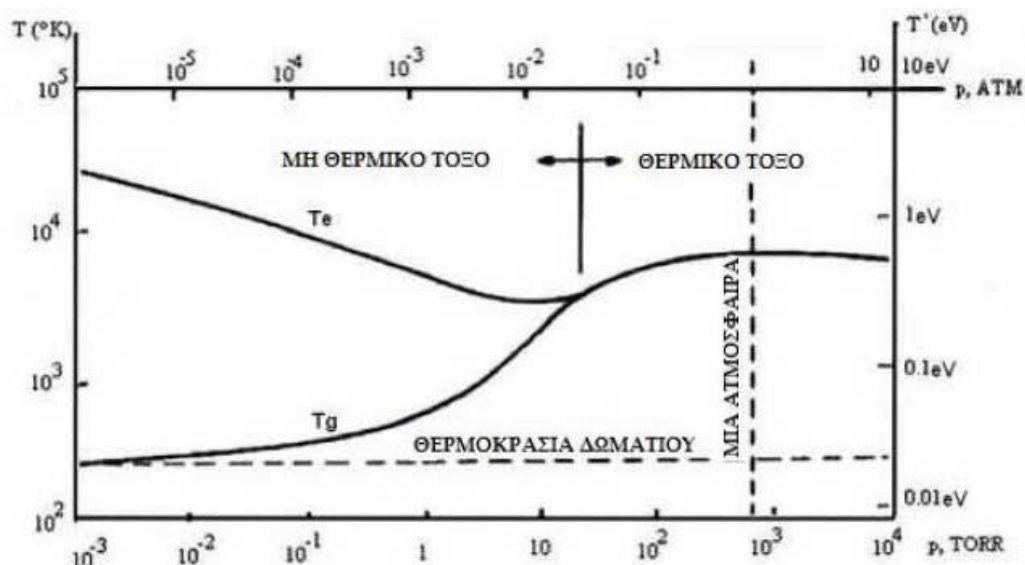
- Αέριο πλούσιο σε μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.
- Στερεό υπόλειμμα που αποτελείται από άνθρακα και αδρανή.
- Συμπυκνωμένο υγρό υπόλειμμα που παρουσιάζει σύσταση παρόμοια με αυτή του υγρού κλάσματος που παράγεται κατά την πυρόλυση.



Σχήμα 2.3.1 Διεργασία Αεριοποίησης (Πηγή: Γιδαράκος, 2006)

2.4 Τεχνολογίες πλάσματος (ψυχρό-θερμό)

Ο όρος πλάσμα, αφορά κάθε αέριο του οποίου τουλάχιστον ένα ποσοστό των ατόμων ή μορίων του, είναι μερικά ή ολικά ιονισμένο. Άλλος ορισμός για το πλάσμα, αναφέρει ότι είναι ένα ηλεκτρικά αγωγίμο αέριο, με επαρκή ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια (Γιδαράκος, 2006).



Σχήμα 2.4 Λειτουργία του τόξου πλάσματος συναρτήσει της πίεσης. (Πηγή: Γιδαράκος, 2006)

Στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.4), παρατηρείται ότι το θερμικό πλάσμα βρίσκεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις από το μη θερμικό πλάσμα, το οποίο μπορεί να υπάρξει και σε πίεση 1 atm. (Mohai & Szepvolgyi, 2005).

Οι κύριες διαφορές μεταξύ αυτών των μεθόδων, παρουσιάζονται στην αναλογία αέρα που χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία των αποβλήτων, και στη φύση των εξερχόμενων προϊόντων. (Juniper, 2006).

2.4.1 Πυρόλυση με την τεχνική του πλάσματος

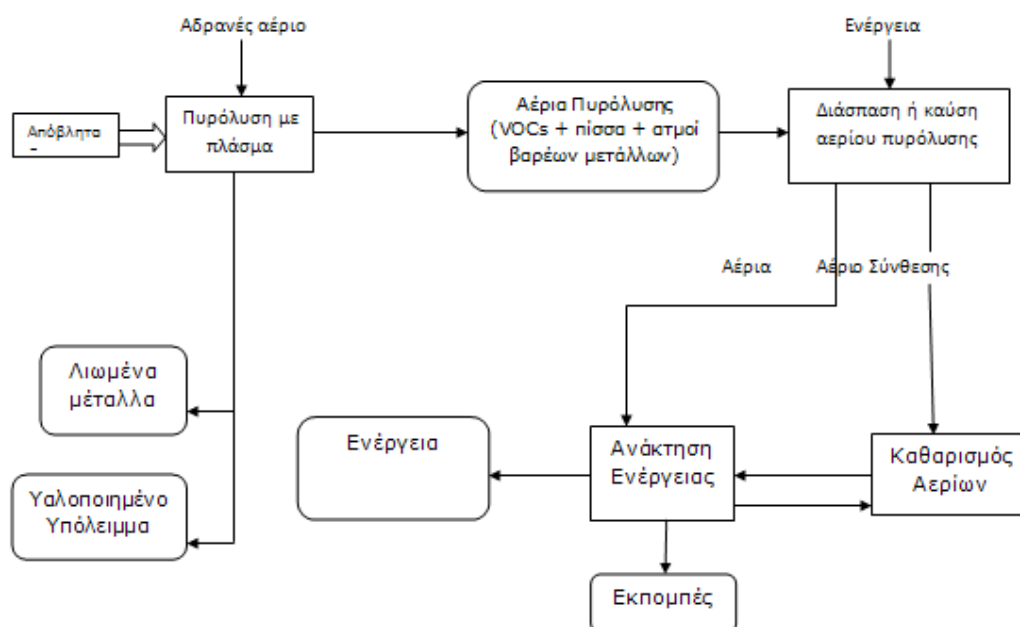
Η συγκεκριμένη διεργασία, πραγματοποιείται είτε σε συνθήκες απουσίας αέρα, είτε παρουσίας αέρα, αλλά σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις στον αντιδραστήρα.

Σε αντίθεση με την καύση και την αεριοποίηση, διεργασία της πυρόλυσης με την τεχνική του πλάσματος είναι ισχυρά ενδόθερμη, και για τη διεξαγωγή της απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας. Κατά την πυρόλυση των στερεών αποβλήτων, τα προϊόντα που παράγονται είναι:

- Αέρια: Αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και διάφορα άλλα αέρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων.

- Υγρά: Το υγρό κλάσμα, είναι ελαιώδες με υψηλή πυκνότητα και ιξώδες, και περιέχει απλά καρβοξυλικά οξέα (π.χ. οξικό οξύ), κετόνες (π.χ. ακετόνη), αλκοόλες (π.χ. μεθανόλη), καθώς και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες. (Nema & Ganeshprasad, 2002).

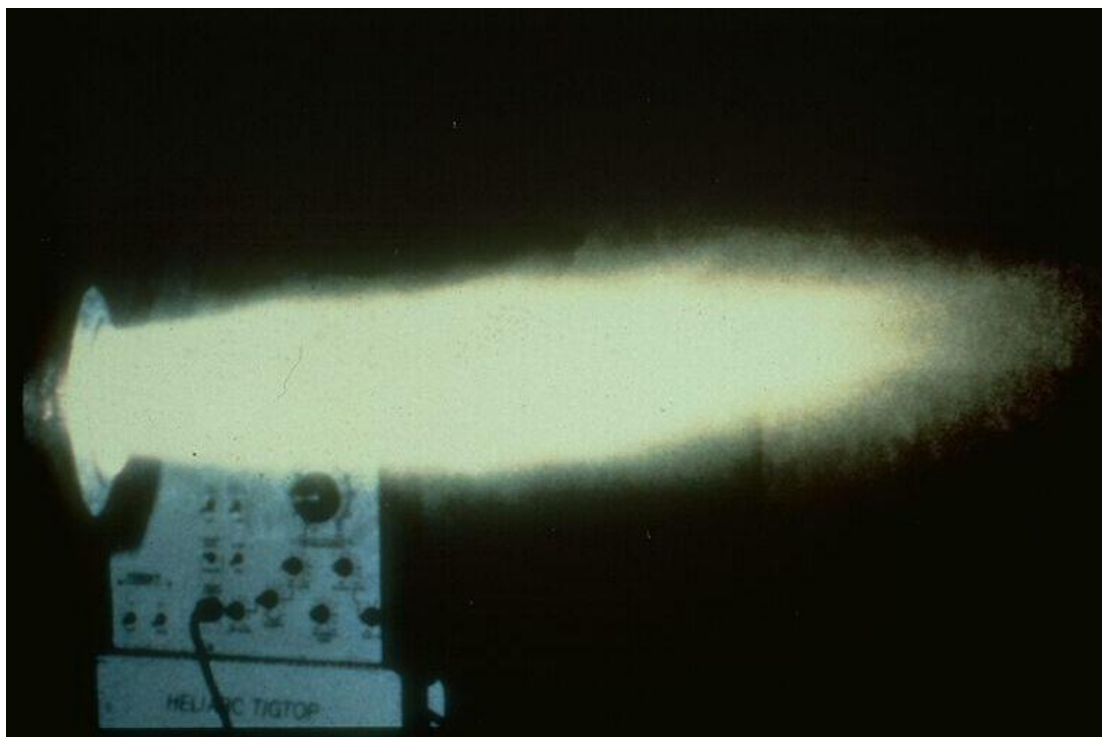
Η αρχή της μετατροπής των αποβλήτων, είναι η ίδια με αυτήν της συμβατικής πυρόλυσης σε υψηλή θερμοκρασία (συνήν αναφερόμενη ως θερμική αεριοποίηση), οι συνθήκες λειτουργίας είναι αρκετά διαφορετικές (850°C σε σύγκριση με άνω των 1.600°C για τις διεργασίες πλάσματος), και για αυτό τα προϊόντα της πυρόλυσης, αναμένεται να είναι διαφορετικά. Αυτό είναι σημαντικό, επειδή υπάρχει το ενδεχόμενο να σχολιάζονται συστήματα αεριοποίησης με την τεχνική του πλάσματος, και να γίνεται αναφορά σε δεδομένα θερμικής αεριοποίησης. Για αυτό τον λόγο δεν πρέπει σε καμία περίπτωση η πυρόλυση πλάσματος (Σχήμα 2.4.1), να συγχέεται με την αεριοποίηση πλάσματος, ή με τεχνολογίες θερμικής αεριοποίησης (Nezu et al., 2003).



Σχήμα 2.4.1: Διάγραμμα ροής πυρόλυσης πλάσματος (Πηγή: Juniper, 2006)

2.4.2 Αεριοποίηση Πλάσματος

Υπάρχουν, δύο γενικές εγκαταστάσεις αεριοποίησης πλάσματος: Εγκαταστάσεις στις οποίες η πηγή πλάσματος (π.χ. πυρσός πλάσματος ,εικόνα 2.4.2 ή τα ηλεκτρόδια), περιέχεται μέσα στον κύριο αντιδραστήρα μετατροπής των αποβλήτων, και οι εγκαταστάσεις στις οποίες η πηγή πλάσματος, είναι εξωτερική του κύριου αντιδραστήρα μετατροπής των αποβλήτων, και χρησιμοποιείται ως πηγή θερμών αερίων. Το τελευταίο σύστημα συχνά αναφέρεται ως «αεριοποίηση υποβοηθούμενη με πλάσμα».



Εικόνα 2.4.2 Πυρσός πλάσματος σε λειτουργία

(Πηγή: <http://www.westinghouse-plasma.com> [10.3.2016])

Η αεριοποίηση με την τεχνική του πλάσματος, πραγματοποιείται σε συνθήκες έλλειψης ατμοσφαιρικού O_2 , το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αερίου σύνθεσης, υαλοποιημένου υπολείμματος, και τηγμένων μετάλλων.(Mohai & Szépnölgyi, 2005).

Η διεργασία περιλαμβάνει λιγότερο αέρα, οπότε τα καυσαέρια έχουν μικρότερο όγκο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να θεωρηθεί κατάλληλη για εφαρμογές που διαθέτουν περιορισμένο χώρο (π.χ. πάνω σε πλοία ή σε απομονωμένες περιοχές, όπως νησιά όπου οι διαθέσιμες εκτάσεις, για εγκατάσταση συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων, είναι ιδιαίτερα περιορισμένες.(Juniper, 2006).

Εκπομπές ρύπων, όπως NO_x και SO₂ αποφεύγονται, αλλά άλλες ενώσεις, όπως το H₂S, NH₃ και CO_s, ενδέχεται να απαιτείται να εξουδετερωθούν. Κάποιες ενώσεις που βρίσκονται σε ποσότητες ιχνών, μπορεί να απαιτούν πιο δραστικά και ακριβά αντίμετρα, σε σύγκριση με την καύση πλάσματος ή τη συμβατική αποτέφρωση (Juniper, 2006).

Λίγες, και μικρής κλίμακας μονάδες αεριοποίησης πλάσματος, λειτουργούν σήμερα στον κόσμο, και αυτές είναι δυναμικότητας μέχρι 10 τόνους ανά ημέρα(π.χ. Pyrogenesis). Τα απόβλητα χρησιμοποιούνται ως πηγή πράσινης ενέργειας, αφού το οργανικό περιεχόμενό τους, μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης, μίγμα H₂ και CO, ενώ ταυτόχρονα το ανόργανο τμήμα των προς επεξεργασία αποβλήτων, μετατρέπεται σε αξιοποιήσιμα αρχιτεκτονικά κεραμίδια και τούβλα κατασκευής.

Ενδεικτικά, μια εταιρεία ανάπτυξης διεργασιών στις Η.Π.Α. η Startech, έχει οδηγήσει το σχεδιασμό της αεριοποίησης πλάσματος, ένα βήμα πιο πέρα και έχει αναπτύξει εφαρμογές, για να χρησιμοποιεί το αέριο σύνθεσης ως πρώτη ύλη για παρασκευή χημικών προϊόντων, κυρίως για ανάκτηση H₂.

Το H₂, μπορεί μελλοντικά να χρησιμοποιηθεί ως οικολογικό - πράσινο καύσιμο σε μεταφορικά μέσα, ενώ ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί σε στροβίλους που κινούνται με αέριο σύνθεσης. (Mountouris et al.,2008).

Συνοπτικά, το κάθε στάδιο της διεργασίας αεριοποίησης πλάσματος περιλαμβάνει τα εξής:

Προεπεξεργασία:. Η προεπεξεργασία, απαιτείται κυρίως σε υλικά με πολύ μεγάλες διαστάσεις, ή σε υλικά με πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Στην τελευταία περίπτωση, απαιτείται ξήρανση μέχρι κάποιο βαθμό, αφού ένα ποσοστό υγρασίας χρειάζεται για την παραγωγή των βασικών συστατικών του αερίου σύνθεσης, δηλαδή του H₂ και του CO.

Αεριοποίηση πλάσματος: Υπό την επίδραση των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων αεριοποιείται, και σχηματίζει αέριο σύνθεσης (μίγμα CO & H₂). Ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να λάβει χώρα η καταστροφή των οργανικών ενώσεων, εξαρτάται από την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας, και τη σύνθεση των αποβλήτων. Κάποιες ενδεικτικές αντιδράσεις παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Αντίδραση	Χαρακτηρισμός αντίδρασης
$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	Καύση
$C + 2 H_2 \leftrightarrow CH_4$	Υδροαεριοποίηση
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	Ατμοποίηση άνθρακα
$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	Boudouard

Πίνακας 2.4.2.1: Αντιδράσεις στερεής φάσης (Mountouris et al.,2008)

Αντίδραση	Χαρακτηρισμός αντίδρασης
$CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$	Αλλαγή υγρού – αερίου
$CO + 3 H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	Μεθανοποίηση

Πίνακας 2.4.2.2: Αντιδράσεις αέριας φάσης (Πηγή:Mountouris et al.,2008)

2.5 Στερεό υπόλειμμα θερμικών διεργασιών

Υπάρχουν δύο τύποι στερεών υπολειμμάτων, κατά την διεργασία της θερμικής επεξεργασίας των αποβλήτων (Patrick et al., 2002):

- 1) Η υπολειμματική τέφρα.
- 2) Η ιπτάμενη τέφρα.

Υπολειμματική τέφρα

Είναι το στερεό υπόλειμμα της καύσης, το οποίο παραμένει στην κλίνη, και απομακρύνεται από τον πυθμένα. επίσης, αποτελεί την κυρίως μάζα του αποβλήτου.

Οι διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα μετά την απομάκρυνση είναι:

- 1) Μηχανική διαλογή
- 2) Γήρανση
- 3) Έκπλυση

Μηχανική διαλογή

Σε αυτή την διεργασία, γίνεται η μηχανική κατεργασία της τέφρας, το κοσκίνισμα, και η κονιοποίηση. Ο σκοπός της μηχανικής διαλογής, είναι η δημιουργία κατάλληλου υλικού, το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή δρόμων. Το συγκεκριμένο υλικό, διαθέτει τα κατάλληλα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, όπως επίσης την υψηλή περιεκτικότητα σε μεταλλικά στοιχεία, ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα στις συγκεκριμένες εργασίες.

Γήρανση

Η διαδικασία της γήρανσης, αποσκοπεί στην σταθεροποίηση των μετάλλων που περιέχονται στην τέφρα, με αντιδράσεις όπως η ενανθράκωση, και η οξείδωση από τον αέρα, προκειμένου να τηρούνται τα όρια εκχυλισιμότητας πριν την τελική διάθεση της.

Έκπλυση

Η έκπλυση της υπολειμματικής τέφρας, γίνεται με νερό. Ο σκοπός της είναι, ο διαχωρισμός των σωματιδίων με μέγεθος κάτω των 2mm, καθώς σε αυτά βρίσκονται τα μεταλλικά στοιχεία, και οι οργανικές ενώσεις οι οποίες πρέπει να απομακρυνθούν.

Ιπτάμενη τέφρα

Ιπτάμενη τέφρα, ονομάζουμε την αιθάλη που διαφεύγει μαζί με το αέριο ρεύμα, το οποίο διαχωρίζεται στο σύστημα καθαρισμού του αερίου.

Οι διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα μετά την απομάκρυνση είναι:

- 1) Στερεοποίηση της τέφρας με τσιμέντο
- 2) Έκπλυση

Στερεοποίηση της τέφρας με τσιμέντο

Η ιπτάμενη τέφρα, αναμιγνύεται με τσιμέντο, νερό, και πυριτικά πρόσθετα, ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο, η εκχυλισιμότητα των βαρέων μετάλλων.

Το συγκεκριμένο προϊόν, δεν χρησιμοποιείται σε κατασκευαστικές εργασίες, αλλά ενταφιάζεται μόνιμα.

Έκπλυση

Η έκπλυση, γίνεται με το όξινο υδατικό διάλυμα της πλυντρίδας, για την εκχύλιση των διαλυτών μετάλλων, και των αλάτων της ιπτάμενης τέφρας. Στην συνέχεια το διάλυμα φιλτράρεται, και το στερεό που κατακρατείται αναμιγνύεται με την υπολειμματική τέφρα, και απορρίπτεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας, των στερεών απορριμμάτων. Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί εκτενώς η μέθοδος της αεριοποίησης, ξεκινώντας με το ιστορικό της.

3.1 Ιστορικό της αεριοποίησης

Η αεριοποίηση, έχει αναπτυχθεί από μια διεργασία μετατροπής λιθάνθρακα σε φωταέριο (town gas), για βιομηχανικό φωτισμό σε μια προηγμένη τεχνολογία, για την παραγωγή μεγάλης ποικιλίας οργανικών προϊόντων και καυσίμων. Το φωταέριο έχει θερμογόνο δύναμη μεταξύ 18 – 21 MJ m³.

Η πρώτη εμπορική χρήση της αεριοποίησης, έλαβε χώρα τον 19ο αιώνα και αφορούσε στην παραγωγή θερμότητας, που εξυπηρετούσε την βιομηχανία, την οικιακή θέρμανση και τον δημόσιο φωτισμό. Καθώς η χρήση των υποδομών, και του δικτύου διανομής ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου αναπτύχθηκε, η χρήση του φωταερίου μειώθηκε, και η ανάπτυξη της τεχνολογίας της αεριοποίησης σταμάτησε. Ωστόσο, η ιστορία έχει δείξει ότι πολλές φορές υπάρχει επιστροφή, ανάπτυξη, και καινοτομία σε παλαιότερες και παραμελημένες τεχνολογίες, όταν η πρόσβαση στο φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, και στα προϊόντα τους περιορίζεται για διαφόρους λόγους.

Σήμερα, κάτω από ολοένα και πιο αυστηρούς περιβαλλοντικούς περιορισμούς, η τεχνολογία της αεριοποίησης αναγεννάτε, και αναπτύσσεται ως μέσο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συνθετικού φυσικού αερίου, υγρών/αερίων καυσίμων, και χημικών προϊόντων που προέρχονται από λιθάνθρακα, βιομάζα, ή άλλα ανθρακούχα υλικά (<http://www.netl.doe.gov>).

3.1.1 Ανακάλυψη και πρώτοι πειραματισμοί

Το 1609 ο Jan Baptista Van Helmont, ένας βέλγος χημικός και φυσικός, ανακάλυψε ότι μπορεί να παραχθεί αέριο από τη θέρμανση ξύλου ή λιθάνθρακα. Μετά την ανακάλυψη αυτή, αρκετοί βοήθησαν στην ανάπτυξη και τη βελτίωση

της διεργασίας της αεριοποίησης:

- Το 1669 ο Thomas Shirley εκτελεί διάφορα πειράματα με «ανθρακούχο υδρογόνο».
- Στα τέλη του 17ου αιώνα, ο John Clayton πειραματίζεται με διατάξεις διαχωρισμού του αερίου ,που παράγεται από λιθάνθρακα.
- Το 1788 ο Robert Gardner, γίνεται ο πρώτος που αποκτά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, που αφορά τη διεργασία της αεριοποίησης.
- Το 1791 ο John Barber λαμβάνει το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε αέριο προϊόν, για να κινήσει μια μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία περιλάμβανε όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός επιτυχημένου αεριοστρόβιλου.
- Το 1798 για πρώτη φορά, συλλαμβάνεται η ιδέα αεριοποίησης βιομάζας, όταν ο Philippe Lebon, δοκιμάζει να αεριοποιήσει ξύλο (<http://www.netl.doe.gov>).

3.1.2 Σημαντικά ορόσημα για την αεριοποίηση από την περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης μέχρι και τον 1^ο παγκόσμιο πόλεμο

Τα σημαντικότερα ορόσημα της αεριοποίησης αναφέρονται παρακάτω με την αύξουσα χρονολογική σειρά τους (<http://www.netl.doe.gov>).

- Το 1792 ο Σκωτσέζος μηχανικός William Murdoch πρώτος συνέλαβε την εμπορική δυνατότητα, που προσέφερε η θέρμανση λιθάνθρακα απουσία αέρα για την παραγωγή αερίου. Ο Murdoch χρησιμοποίησε αυτό το αέριο για να παρέχει φωτισμό στο σπίτι του, καθώς βελτίωνε τις μεθόδους που εφαρμόζε. Συνεργάστηκε με τους Matthew Boulton και τον μετέπειτα διάσημο κατασκευαστή ατμομηχανών James Watt για την ανάπτυξη και την εμπορική εκμετάλλευση συστημάτων βιομηχανικού φωτισμού, στην Αγγλία στο τέλος του 18ου αιώνα (<http://www.netl.doe.gov>).
- Το 1807, το φωταέριο χρησιμοποιείται για τον φωτισμό των δρόμων του Λονδίνου, και μέχρι το 1816 το μεγαλύτερο μέρος της πόλης ήδη φωταγωγείται.

- Το 1804 δόθηκε για πρώτη φορά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στον Freidrich Winzer για φωτισμό από αέριο προερχόμενο από λιθάνθρακα. Η εταιρεία London and Westminster Gas Light & Coke φωταγόγησε τη γέφυρα του Westminster το βράδυ της παραμονής πρωτοχρονιάς του 1813 χρησιμοποιώντας φωταέριο μέσω ξύλινων αγωγών.
- Η εταιρεία Baltimore Gas Company έγινε η πρώτη εταιρεία φωταερίου στις ΗΠΑ το 1816, παρέχοντας φωταέριο για το φωτισμό των δρόμων της Βαλτιμόρης.
- Μετά την εισαγωγή του φωταερίου στη Βαλτιμόρη, ο φωτισμός των δρόμων με τη χρήση του, εξαπλώθηκε σε όλες τις πόλεις των ανατολικών πολιτειών των ΗΠΑ, συμπεριλαμβανομένης της Βοστώνη το 1821, της Νέας Υόρκης το 1823 και της Φιλαδέλφειας το 1841
- Την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης και στις δυτικές χώρες, σχεδόν κάθε μεγάλη αστική περιοχή, είχε το δικό της εργοστάσιο μετατροπής του λιθάνθρακα σε φωταέριο για την παροχή καυσίμου, για το φωτισμό, τη θέρμανση και το μαγείρεμα.

Η αεριοποίηση συνέχιζε να παίζει ένα σημαντικό ρόλο ως μια τεχνολογία ενεργειακού εφοδιασμού, μέχρι που η πρόοδος στον ασφαλέστερο ηλεκτρικό φωτισμό που συντελέστηκε κυρίως από τον Nicolas Tesla και τον Thomas Edison στη δεκαετία του 1880 ώθησε το φωταέριο έξω από τον βασικό πυρήνα της αγοράς φωτισμού και θέρμανσης.

Η αύξηση των πηγών φυσικού αερίου και η βελτίωση των αντίστοιχων υποδομών στις αρχές του 20ου αιώνα παρείχε μια χαμηλού κόστους εναλλακτική επιλογή για εφαρμογές σχετικές με τη θέρμανση και το μαγείρεμα, περιορίζοντας τη χρήση της αεριοποίησης σε τομείς που δεν είχαν πρόσβαση στο φυσικό αέριο. Πριν από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο στις ΗΠΑ λειτουργούσαν περίπου 20,000 αεριοποιητές.

3.1.3 Αεριοποίηση και ανάπτυξη υγρών καυσίμων για τις μεταφορές κατά την περίοδο του μεσοπολέμου και κατά τη διάρκεια του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου

Το σημαντικότερο βήμα στην ανάπτυξη της αεριοποίησης έγινε στη Γερμανία λίγο πριν το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, όταν αναπτύχθηκαν οι διεργασίες για την παραγωγή υγρών καυσίμων από αέριο σύνθεσης που έχει προκύψει από αεριοποίηση (Lesch, 2000).

Τη δεκαετία του 1920, η Γερμανία είχε συνειδητοποιήσει την εξάρτησή της από το εισαγόμενο πετρέλαιο ως αποτέλεσμα των αποκλεισμών που είχε υποστεί (εμπάργκο) λόγω του 1^{ου} παγκοσμίου πολέμου. Επιπλέον, ο πόλεμος είχε εξαντλήσει κάθε οικονομική δυνατότητα της Γερμανίας να αγοράζει ξένο πετρέλαιο. Εν μέσω φημών παγκόσμιας εμβέλειας ότι τα αποθέματα πετρελαίου σύντομα θα εξαντληθούν, η Γερμανία αποφάσισε να αναπτύξει τις μεθόδους εκείνες που θα της επέτρεπαν να παράγει υγρά καύσιμα εκμεταλλευόμενη τα πλούσια αποθέματα λιθάνθρακα που είχε.

Κατά τη διάρκεια των ετών 1910 έως 1925, ο Γερμανός χημικός Friedrich Bergius ανέπτυξε μια διεργασία υδρογόνωσης ή υγροποίησης του λιθάνθρακα σε υψηλή πίεση 200 – 700 bar και θερμοκρασία 400°C – 500°C, γνωστή και ως διεργασία του Bergius, για να παράγει υγρά καύσιμα από τη μετατροπή του λιθάνθρακα:



Οι Γερμανοί επιστήμονες Franz Fischer και Hans Tropsch ανέπτυξαν μια δεύτερη διεργασία υδρογόνωσης ή υγροποίησης του λιθάνθρακα, η οποία ονομάζεται και διεργασία Fischer-Tropsch μέσω της οποίας το αέριο σύνθεσης που έχει παραχθεί από την αεριοποίηση του λιθάνθρακα μετατρέπεται τελικά σε υγρά καύσιμα. Μέχρι το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου το 1945, στη Γερμανία έχουν ήδη κατασκευαστεί 12 μονάδες υδρογόνωσης λιθάνθρακα και 9 μονάδες Fischer – Tropsch (Lesch, 2000).

Άλλη μία τεχνολογία προς ανάπτυξη για τις μεταφορές στη δεκαετία του 1920 δημιουργήθηκε από τον Γερμανό μηχανικό Georges Imbert, ο οποίος κατασκεύασε μια γεννήτρια αεριοποίησης ξύλου για κινητή χρήση. Τα αέρια που είχαν καθαριστεί και ξηρανθεί, εν συνέχεια τροφοδοτούσαν τον

κινητήρα εσωτερικής καύσης του οχήματος (Εικόνα 3.1.3), ο οποίος μόλις και μετά βίας θα πρέπει να ρυθμιστεί. Η γεννήτρια Imbert ήταν μαζικής παραγωγής από το 1931. Στο τέλος της δεκαετίας του 1930, περίπου 9.000 αυτοκίνητα αεριοποίησης ξύλου ήταν σε χρήση σχεδόν αποκλειστικά στην Ευρώπη (<http://www.teamenergy.gr/>).



Εικόνα 3.1.3 Όχημα με γεννήτρια imbert (Πηγή: <http://www.teamenergy.gr/>)

Κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, σχεδόν κάθε μηχανοκίνητο όχημα στην Ηπειρωτική Ευρώπη μετατράπηκε στο να χρησιμοποιεί καυσόξυλα (<http://www.teamenergy.gr/>). Η παραγωγή οχημάτων παραγωγής αερίου από καυσόξυλα ήταν μια όχι και τόσο κομψή, αλλά εκπληκτικά αποτελεσματική και οικολογική εναλλακτική λύση έναντι των πετρελαιοκίνητων και βενζινοκίνητων οχημάτων (Εικόνα 3.1.3.1). Η αύξηση των τιμών των καυσίμων και η υπερθέρμανση του πλανήτη έχουν προκαλέσει ανανεωμένο ενδιαφέρον για αυτή τη σχεδόν ξεχασμένη τεχνολογία.



Εικόνα 3.1.3.1 Όχημα ξυλαέριου (Πηγή: <http://www.teamenergy.gr/>)

Τα Woodmobiles εμφανίστηκαν επίσης στις ΗΠΑ, την Ασία και ειδικότερα την Αυστραλία, η οποία είχε 72,000 οχήματα που λειτουργούσαν με ξυλαέριο. Συνολικά, περισσότερα από ένα εκατομμύριο αυτοκίνητα με ξυλαέριο χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου (Εικόνα 3.1.3.2). Μετά τον πόλεμο, με την βενζίνη και πάλι διαθέσιμη, η τεχνολογία έπεσε σε λήθη σχεδόν ακαριαία. Στις αρχές της δεκαετίας του 1950, στην τότε Δυτική Γερμανία είχαν παραμείνει περίπου 20.000 woodmobiles.



Εικόνα 3.1.3.2 Woodmobile (Πηγή: <http://www.teamenergy.gr/>)

3.1.4 Πορεία της αεριοποίησης μετά τον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο μέχρι και σήμερα

Η σταδιακή ανάπτυξη της τεχνολογίας της αεριοποίησης, από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο έως και σήμερα αναλύεται πιο κάτω (<http://www.netl.doe.gov>).

Τα χρόνια που ακολούθησαν το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, πολλές χώρες είχαν πρόσβαση σε μεγάλες προμήθειες βενζίνης και ντίζελ χαμηλού κόστους, που είχε ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση του ρόλου της αεριοποίησης ως μέσου παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, η πολιτική και γεωγραφική απομόνωση της Νοτίου Αφρικής οδήγησε στην ανάπτυξη μιας μεγάλης βιομηχανίας λιθάνθρακα σε υγρά καύσιμα (coal-to-liquid fuels). Το 1950, η κυβέρνηση της Νοτίου Αφρικής χρηματοδότησε την κατασκευή βιομηχανικής εγκατάστασης αεριοποίησης, την SASOL I, η οποία χρησιμοποιούσε αμερικανικές και γερμανικές διεργασίες για την παραγωγή καυσίμου ντίζελ, βενζίνης μέσου αριθμού οκτανίων, υγραερίου και ποικιλίας χημικών, την οποία ανέλαβε η SASOL (South African Coal, Oil and Gas Corporation Limited). Μετά από λειτουργικές βελτιώσεις για την αύξηση της αποδοτικότητας και της οικονομίας της εγκατάστασης αναπτύχθηκαν παράλληλα και διεργασίες για την παραγωγή συνθετικών ελαστικών, λιπασμάτων και άλλων δευτερευόντων χημικών.

Η Νότια Αφρική συνέχισε να επεκτείνει τις εγκαταστάσεις αεριοποίησης με την κατασκευή της SASOL II το 1980 και της SASOL III το 1982, ως αποτέλεσμα της πετρελαϊκής κρίσης που απειλούσε να μειώσει τις προμήθειες της χώρας σε πετρέλαιο από τη Μέση Ανατολή

Στις ΗΠΑ, το ενδιαφέρον για την αεριοποίηση ανανεώθηκε τη δεκαετία του 1970 λόγω των ελλείψεων σε φυσικό αέριο και της μειωμένης πρόσβασης σε πετρέλαιο που προκλήθηκε από το αραβικό εμπάργκο πετρελαίου το 1973 και το 1979. Αποτέλεσμα αυτών ήταν η κυβέρνηση των ΗΠΑ να χρηματοδοτήσει την έρευνα στις τεχνολογίες αεριοποίησης για την παραγωγή ενέργειας και υγρών καυσίμων. Το 1983, η εταιρεία Eastman Chemicals εγκαινίασε μια πρώτη στο είδος της εμπορική βιομηχανική εγκατάσταση αεριοποίησης λιθάνθρακα που παρήγαγε χημικά. Το 1984, ξεκίνησε η λειτουργία της πρώτης βιομηχανικής εγκατάστασης ολοκληρωμένης αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου (IGCC),

κοντά στο Barstow της California, η οποία παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της αεριοποίησης λιθάνθρακα. Το 1984 επίσης, μια κοινοπραξία εταιρειών παραγωγής ενέργειας, κατασκεύασε μια μεγάλη βιομηχανική εγκατάσταση, η οποία παρήγαγε συνθετικό φυσικό αέριο από λιγνίτη. Ωστόσο, η κατάρρευση των τιμών του πετρελαίου παγκοσμίως στα μέσα της δεκαετίας του 1980 απομάκρυνε την προσοχή από την αεριοποίηση, μιας και φθηνότερες προμήθειες πετρελαίου ήταν και πάλι διαθέσιμες.

Τη δεκαετία του 1990 με τις τιμές του πετρελαίου και πάλι σε άνοδο, η αυξανόμενη αστάθεια στη Μέση Ανατολή, η αυξανόμενη συνειδητοποίηση και το ενδιαφέρον για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ενέργειας από καύση ορυκτών υδρογονανθράκων, η Ευρώπη και οι ΗΠΑ υποστηρίζουν «καθαρότερες» και εναλλακτικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, αναβιώνει και αναπτύσσεται η τεχνολογία της αεριοποίησης, προκειμένου να ικανοποιήσει τις σύγχρονες επιταγές για καθαρότερη παραγωγή ενέργειας και να συμβάλει στην προσπάθεια για απεξάρτηση από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα και ενεργειακή αυτονομία. Την περίοδο αυτή, γνωρίζει μεγάλη αποδοχή και βιομηχανική εφαρμογή, η τεχνολογία της ολοκληρωμένης αεριοποίησης σταθμού ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου (IGCC).

Στις αρχές του 1990, η εταιρεία Texaco κατασκευάζει κοντά στο Mulberry της Florida ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας IGCC. Το 1994 βασισμένη σε τεχνολογία της Shell κατασκευάζεται μια εγκατάσταση IGCC στο Buggenum της Ολλανδίας. Το 1995, με τεχνολογία που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Dow Chemical κατασκευάζεται βιομηχανική εγκατάσταση IGCC κοντά στο Terre Haute της Indiana των ΗΠΑ.

Ακολουθώντας την επιτυχημένη πορεία των βιομηχανιών της δεκαετίας του 1990, ολοένα και περισσότερες βιομηχανικές εγκαταστάσεις κατασκευάζονται σε παγκόσμια κλίμακα για την παραγωγή χημικών, συνθετικού φυσικού αερίου, υδρογόνου και υγρών καυσίμων. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί, η βιομηχανική εγκατάσταση IGCC στο Nakoso της Ιαπωνίας δυναμικότητας 250 MW με τροφοδοσία λιθάνθρακα 1,700 t day⁻¹, που ξεκίνησε τη λειτουργία της το 2007 (Εικόνα 3.1.4). Η εγκατάσταση περιλαμβάνει αεριοποιητή ροής με παράσυρση (entrained flow) δύο σταδίων, με εμφύσηση

αέρα και ξηρής τροφοδοσίας (<http://www.mpshq.com>, 2016).



Εικόνα 3.1.4 Εγκατάσταση IGCC (στο Nakoso της Ιαπωνίας) (Πηγή: <http://www.mpshq.com>, 2016)

Μία από τις πιο σύγχρονες τάσεις μεθόδου θερμικής επεξεργασίας στην Ευρώπη σήμερα είναι η αεριοποίηση των ΑΣΑ. Η διεργασία αυτή περιλαμβάνει την μετατροπή του οργανικού κλάσματος των απόβλητων, σε ένα μίγμα καυσίμων αερίων, μέσω της μερικής οξείδωσης. Σαν οξειδωτικό μέσο, χρησιμοποιείται ατμοσφαιρικός αέρας, είτε εμπλουτισμένος με οξυγόνο η με καθαρό οξυγόνο. Η διεργασία, λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες από 900 έως 1,100 °C με αέρα, και από 1,000 έως 1,400 °C με οξυγόνο. Μία παραγωγική μονάδα τύπου αεριοποίησης απορριμματογενών καυσίμων (τύπου RDF), η οποία είναι ήδη σε λειτουργία, είναι στο Greve-in-Chianti (Ιταλία). Ένας από τους βασικότερους στόχους της συγκεκριμένης μονάδας είναι η παραγωγή αερίου (syngas) (Granatstein, 2003).

Γενικά, κάποια από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της αεριοποίησης των ΑΣΑ είναι: 1) Οι δυνατότητες αξιοποίησης του αερίου (syngas), 2) Το περιβαλλοντικό όφελος από τα κατάλοιπα του αερίου προϊόντος όπως οι πίσσες και τα ανόργανα

συστατικά που λαμβάνονται ως τέφρα, τα οποία επεξεργάζονται και χρησιμοποιούνται σε διάφορες άλλες διεργασίες. Τα βασικότερα μειονεκτήματα, είναι: 1) Η ανομοιογένεια της πρώτης ύλης, η οποία δημιουργεί προβλήματα στην διεργασία, 2) Η σχετικά μικρή εμπειρία εφαρμογών της και 3) Η αυξημένη επικινδυνότητα λόγω διακίνησης του καύσιμου αερίου. (McKendry, 2001).

3.2 Διεργασία και προϊόντα αεριοποίησης

Τέσσερις διακριτές διεργασίες λαμβάνουν χώρα στον αεριοποιητή, καθώς η βιομάζα αεριοποιείται. Οι τέσσερις αυτές διεργασίες διεξάγονται σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες σ' έναν αντιδραστήρα αεριοποίησης. Αυτές οι ζώνες, καθώς και οι σημαντικότερες χημικές αντιδράσεις που διεξάγονται σ' αυτές, είναι οι εξής (Malkow, 2004):

1) Ξήρανση (Drying)

Η ξήρανση είναι απαραίτητη για να απομακρυνθεί υγρασία, έτσι ώστε τελικά να παραμείνει μόνο το απαραίτητο ποσοστό, το οποίο κατά κανόνα εξαρτάται από τον υφιστάμενο λόγο C:O. Σε θερμοκρασίες πάνω από τους 100°C, η υγρασία της βιομάζας απομακρύνεται και μετατρέπεται σε υδρατμό, ο οποίος απομακρύνεται. Κατά το στάδιο της ξήρανσης, η βιομάζα δεν υφίσταται καμία αποσύνθεση.

2) Πυρόλυση (Pyrolysis)

Η πυρόλυση της βιομάζας είναι η θερμική της κατεργασία απουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου. Κατά το στάδιο της πυρόλυσης, η βιομάζα αποσυντίθεται με διάσπαση των ασθενέστερων χημικών δεσμών της με συνέπεια την απελευθέρωση πτητικών αερίων (devolitization) και την παραγωγή κωκ υψηλού μοριακού βάρους. Η πυρόλυση περιλαμβάνει την δημιουργία τριών ειδών προϊόντων: Στερεών, υγρών και αερίων. Η αναλογία αυτών των προϊόντων επηρεάζεται από τη χημική σύνθεση της βιομάζας και από τις συνθήκες λειτουργίας της αεριοποίησης. Η θερμογόνο δύναμη του αερίου, που παράγεται κατά το στάδιο της πυρόλυσης, είναι χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ 3.5 και 8.9 MJ m⁻³. Το βασικό θερμοκρασιακό εύρος, στο οποίο λαμβάνει χώρα η πυρόλυση,

κυμαίνεται μεταξύ 280°C και 500°C. Μεταξύ 500°C και 700°C, η απόδοση παραγωγής πτητικών είναι μικρότερη και το υδρογόνο είναι το κύριο συστατικό τους. Σημειώνεται ότι, ανεξάρτητα από τον τύπο του αεριοποιητή, υπάρχει πάντα μια ζώνη χαμηλότερης θερμοκρασίας όπου λαμβάνει χώρα η πυρόλυση παράγοντας υδρογονάνθρακες.

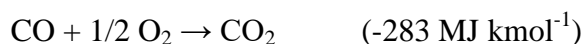
3) Αναγωγή (Reduction)

Τμήμα του άνθρακα που περιέχεται στο κωκ αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα και τον υδρατμό προκειμένου να παραχθεί μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Οι κύριες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτό το στάδιο είναι:

$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	(+131 MJ kmol ⁻¹), αντίδραση water-gas
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	(+172 MJ kmol ⁻¹), αντίδραση Boudouard
$C + 2 H_2 \rightarrow CH_4$	(-75 MJ kmol ⁻¹), αντίδραση μεθανίωσης

4) Καύση – Οξείδωση

Στη ζώνη αυτή, λαμβάνει χώρα μερική καύση ή οξείδωση. Τα πτητικά προϊόντα των παραπάνω σταδίων και μέρος του άνθρακα που περιέχεται στο κωκ αντιδρούν με οξυγόνο και σχηματίζουν διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η απαιτούμενη θερμότητα για τις αντιδράσεις που διεξάγονται. Οι εξώθερμες αντιδράσεις καύσης-οξείδωσης είναι:



Ο αέρας που εισέρχεται στη ζώνη οξείδωσης περιέχει, εκτός από οξυγόνο και υδρατμούς, αδρανή αέρια όπως άζωτο και αργό. Τα αδρανή αέρια δεν αντιδρούν με τα συστατικά του καυσίμου της τροφοδοσίας, ενώ ο υδρατμός μπορεί να αντιδράσει.

Καθοριστικό ρόλο στη σύσταση του αερίου σύνθεσης παίζουν οι δύο ομογενείς αντιδράσεις στην αέρια φάση, οι οποίες είναι: Η αντίδραση αναμόρφωσης μονοξειδίου του άνθρακα με υδρατμό, γνωστή σαν αντίδραση

water gas shift και η αντίδραση αναμόρφωσης του μεθανίου με υδρατμό. Οι αντιδράσεις αυτές φθάνουν σε χημική ισορροπία και διαμορφώνουν τη σύσταση του αερίου σύνθεσης, ειδικά το λόγο υδρογόνου προς μονοξείδιο του άνθρακα.

$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (-41 MJ kmol⁻¹), αντίδραση water gas shift

$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ (+206 MJ kmol⁻¹), αντίδραση αναμόρφωσης μεθανίου

Η αντίδραση water gas shift (wgs) είναι εξώθερμη και ευνοείται στη ζώνη της αναγωγής (περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας απ' αυτήν της ζώνης οξείδωσης). Αντίθετα, η αναμόρφωση του μεθανίου με υδρατμό σαν ενδόθερμη αντίδραση ευνοείται στη ζώνη της οξείδωσης.

3.2.1 Υπόλειμμα πισσούχου παραπροϊόντος

Τα σημαντικότερα παραπροϊόντα, που δημιουργούνται κατά την διεργασία της αεριοποιήσεως στερεών απορριμμάτων και βιοστερεών, είναι τα ανόργανα συστατικά τα οποία λαμβάνονται ως τέφρα συνήθως μαζί με την παραγόμενη πίσσα. Ως τέφρα ορίζεται το υπόλειμμα από την καύση του άνθρακα, το οποίο είναι πλούσιο σε ανόργανα συστατικά, και αποτελεί ανεπιθύμητο παραπροϊόν. Περιέχει κυρίως οξείδια Si, Al, Fe, Ca και άλλα ανόργανα συστατικά. Διακρίνεται σε μόνιμη και ελεύθερη τέφρα. Η ελεύθερη τέφρα απομακρύνεται με τη βοήθεια διάφορων μεθόδων εμπλουτισμού του άνθρακα. Ιπτάμενη τέφρα είναι η τέφρα, η οποία παρασύρεται από τα αερίδια και κατακρατείται σε ηλεκτροστατικά φίλτρα ή συγκεντρώνεται στον πυθμένα του αεριοποιητή. Όταν οι ποσότητες της τέφρας είναι μεγάλες δημιουργείται σοβαρό πρόβλημα κατά την διεργασία της αεριοποίησης (<http://eclass.uth.gr>).

Επίσης, ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα κατά την διεργασία της αεριοποίησης είναι η παραγόμενη πίσσα, η οποία πολλές φορές αναφέρεται και ως εξανθράκωμα. Ως πίσσα ορίζουμε τα προϊόντα αεριοποίησης οργανικών, που αποτελούνται από αρωματικούς υδρογονάνθρακες και έχουν την ιδιότητα να συμπυκνώνονται. Είναι ουσίες που ποικίλουν και διαφοροποιούνται αισθητά, και αυτό εξαρτάται από τον τρόπο αεριοποίησης της βιομάζας. Οι κατηγορίες πίσσας (Πίνακας 3.2.1) είναι οι εξής:

	Κατηγορίες πίσσας
1)	Πίσσα η οποία δεν ανιχνεύεται από τον χρωματογράφο μάζας
2)	Ετεροκυκλικά συνθετικά.
3)	Συστατικά που ανιχνεύονται στον χρωματογράφο αλλά δεν αναγνωρίζονται.
4)	Ελαφροί πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες.
5)	Αρωματικά συστατικά, τα οποία είναι σημαντικά για τις αντιδράσεις της πίσσας.

Πίνακας 3.2.1 Κατηγορίες πίσσας (Πηγή: Patrick et al., 2002)

Η πίσσα έχει την ικανότητα να παρευρίσκεται στο παραγόμενο αέριο σε πάρα πολύ μικρές ποσότητες, οι οποίες μπορεί να μην φαίνονται στους υπολογισμούς της στοιχειομετρίας. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της προβλεπόμενης συντήρησης διαφόρων τεχνικών εξαρτημάτων, διότι προσκολλάτε στα μηχανικά μέρη του κινητήρα όπως ο χώρος καύσης, τα έμβολα και οι κύλινδροι. Αυτό έχει ως συνέπεια, κάποια μακροπρόθεσμα σοβαρά τεχνικά προβλήματα.

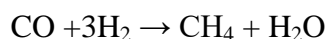
Τέλος, κάποιες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την μείωση παραγωγής της πίσσας είναι:

- 1) Οι χημικές μέθοδοι: Διάσπαση της πίσσας σε θερμοκρασία $1,250^{\circ}\text{C}$ με χρόνο παραμονής 0,5 s και αποτελεσματικότητα 99 %.
- 2) Η χημική διαδικασία (OLGA): Απομακρύνονται όλα τα είδη πίσσας, ως και (>97%).
- 3) Η χρήση καταλυτών.
- 4) Οι μηχανικές μέθοδοι : Συμπεριλαμβάνουν φίλτρα και διαχωριστές.

3.2.2 Αέριο σύνθεσης (Synthesis Gas)

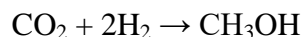
Κατά την διεργασία της αεριοποίησης, η οργανική ύλη θερμαίνεται με παρουσία περιορισμένης ποσότητας O_2 ή αέρα για τη μέγιστη απελευθέρωση CO και H_2 . Το μείγμα CO και H_2 είναι γνωστό σαν αέριο σύνθεσης (Syngas).

Στη δεύτερη περίπτωση, το τελικό αέριο περιέχει περίπου 40% N₂, πράγμα που μειώνει τη θερμαντική αξία του αερίου από 13 MJ/m³ σε 7 MJ/m³. Εάν επιδιώκεται μετατροπή του αερίου σύνθεσης σε κάποιο πιο χρήσιμο προϊόν, συγκεκριμένα μεθανόλη ή αμμωνία, καλό είναι να αποφεύγεται η παρουσία του N₂, που είναι αδρανές. Για τη μετατροπή του syngas, γίνονται οι εξής αντιδράσεις (Wender, 1996):



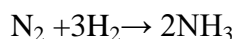
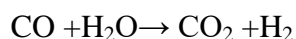
Η πρώτη αντίδραση είναι απαραίτητη για την αύξηση του H₂ στο μείγμα, στην αναλογία περίπου 1CO:3H₂. Η δεύτερη, είναι ισχυρά εξώθερμη αντίδραση.

Η μετατροπή σε μεθανόλη, γίνεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Η αντίδραση αυτή, όπως και οι προηγούμενες γίνεται, παρουσία κατάλληλων καταλυτών. Το τελικό προϊόν περιέχει σαν πρόσμιξη αιθανόλη, νερό και ανώτερες αλκοόλες, ωστόσο η περιεκτικότητα σε μεθανόλη είναι 98% περίπου.

Για τη μετατροπή σε αμμωνία απαιτείται απομάκρυνση όλου του CO, το οποίο μετατρέπεται κατά το μεγαλύτερο μέρος σε CO₂ και δίνει H₂:

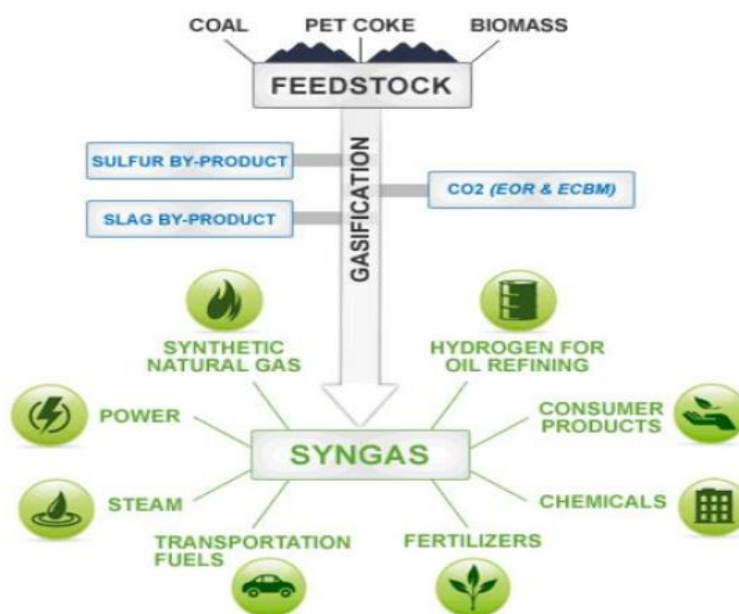


Επίσης, η χημική σύσταση του αερίου σύνθεσης εξαρτάται από τον τύπο της οργανικής ύλης, και από τη και τη θερμοκρασία. Το αρχικό αέριο, που παράγεται σε θερμοκρασιακό εύρος 800°C – 1,000°C, περιέχει CO, H₂, CH₄, C_xH_y, αλειφατικούς υδρογονάνθρακες, βενζόλιο, τολουόλιο και πίσσες. Περίπου το 50% της ενέργειας του αερίου περιέχεται στα CO και H₂ και το υπόλοιπο περιέχεται στο μεθάνιο και τους αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Σε θερμοκρασίες από 1,200°C - 1,400°C η βιομάζα μετατρέπεται πλήρως σε H₂ και CO (εκτός από CO₂ και H₂O), ενώ η ποιότητα του παραγόμενου αερίου είναι παρόμοια με το φυσικό αέριο που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα (Mann & Spath, 1997).

Η παρουσία συμπυκνωμένων οργανικών ενώσεων και πισσών στο παραγόμενο αέριο είναι αναπόφευκτη αλλά και ανεπιθύμητη, καθώς μειώνει την απόδοση του αερίου και δημιουργεί επιπλέον προβλήματα στις αντίστοιχες διατάξεις αεριοποίησης (εμφράξεις σωληνώσεων, σκωρίες κ.τ.λ.). Οπότε, αποτελεί επιτακτική ανάγκη ο καθαρισμός του αερίου πριν την τελική του χρήση (Σχήμα 3.2.2). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: Πρωτογενή καθαρισμό, όπου το αέριο καθαρίζεται εντός του αεριοποιητή είτε με την προσθήκη καταλυτών, είτε με καινοτόμους – σχεδιασμούς διατάξεων στους αεριοποιητές και δευτερογενή καθαρισμό, ο οποίος πραγματοποιείται στο παραγόμενο θερμό αέριο μετά την έξοδό του από τον αντιδραστήρα, το οποίο είναι συγκριτικά με τον πρώτο τρόπο, οικονομικά ασύμφορο (Bain, 1992).

Το παραγόμενο αέριο μπορεί να αξιοποιηθεί κατά διάφορους τρόπους, οι βασικότεροι των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω (Kumabe et al., 2007):

- Καύση για παραγωγή ατμού. Το πλεονέκτημα, που παρουσιάζεται έναντι της καύσης-αποτέφρωσης, είναι ότι τα αέρια καθαρίζονται πριν την καύση δίνοντας έτσι την δυνατότητα λειτουργίας του ατμολέβητα σε υψηλότερες πιέσεις και του υπερθερμαντήρα του ατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ούτως ώστε να επιτυγχάνονται βελτιωμένες αποδόσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, που μπορούν να πλησιάσουν το 30%.



Σχήμα 3.2.2 Σχηματικό διάγραμμα χρήσεων (syngas)

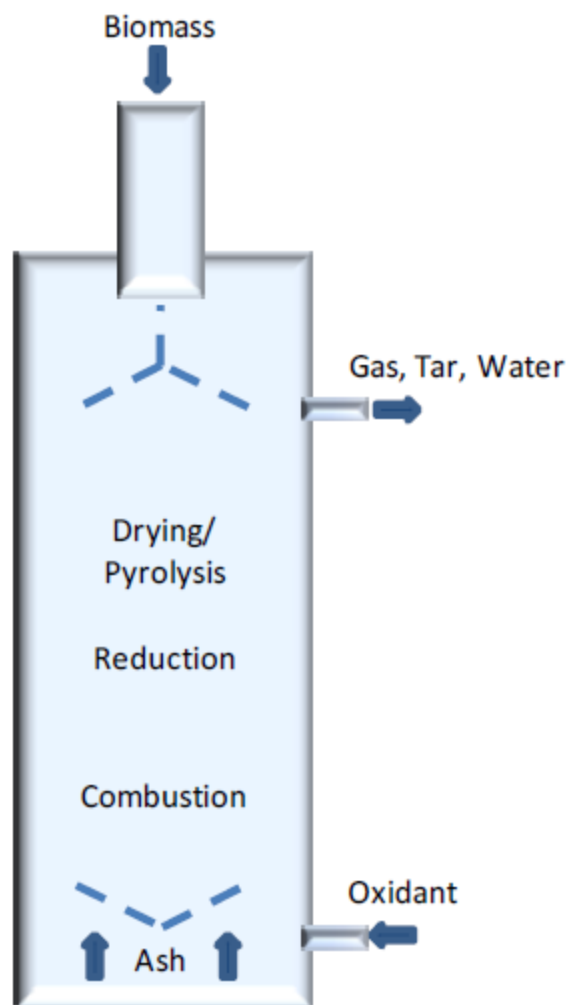
(Πηγή:<http://www.mpsHQ.com>, 2016)

- Τροφοδοσία μηχανής εσωτερικής καύσης, που κινεί ηλεκτρογεννήτρια. Η απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να φτάσει το 35%, αλλά προϋποθέτει πολύ καλό καθαρισμό των αερίων πριν την τροφοδοσία της μηχανής.
- Κίνηση αεριοστρόβιλου και ατμοπαραγωγή σε συνδυασμένο κύκλο. Η μέθοδος αυτή, που προϋποθέτει επίσης πολύ καλό καθαρισμό των αερίων πριν την τροφοδοσία, έχει την δυνατότητα να μπορεί να οδηγήσει σε αποδόσεις της τάξης του 40% σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Διοχέτευση στο δίκτυο αερίου πόλης. Απαραίτητη προϋπόθεση ο καλός καθαρισμός και η σταθερή ποιότητα.
- Παροχή του αερίου σε βιομηχανία, όπως τσιμεντοβιομηχανία για απ' ευθείας καύση σε εστία. Στην περίπτωση αυτή μειώνονται πολύ σημαντικά οι απαιτήσεις καθαρισμού.
- Παροχή του αερίου σε βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται για ατμοπαραγωγή..

3.3 Τύποι αεριοποιητών

Οι κύριοι τύποι αεριοποιητών είναι οι εξής:

- Σταθερής κλίνης ανοδικής ροής(updraft)
- Σταθερής κλίνης καθοδικής ροής (downdraft)
- Ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed)
- Περιστρεφόμενου τυμπάνου(rotary drum)
- Ροής με παράσυρση (entrained flow)



Εικόνα 3.3.1 Αεριοποιητής (updraft) (Πηγή:Gikas,2014)

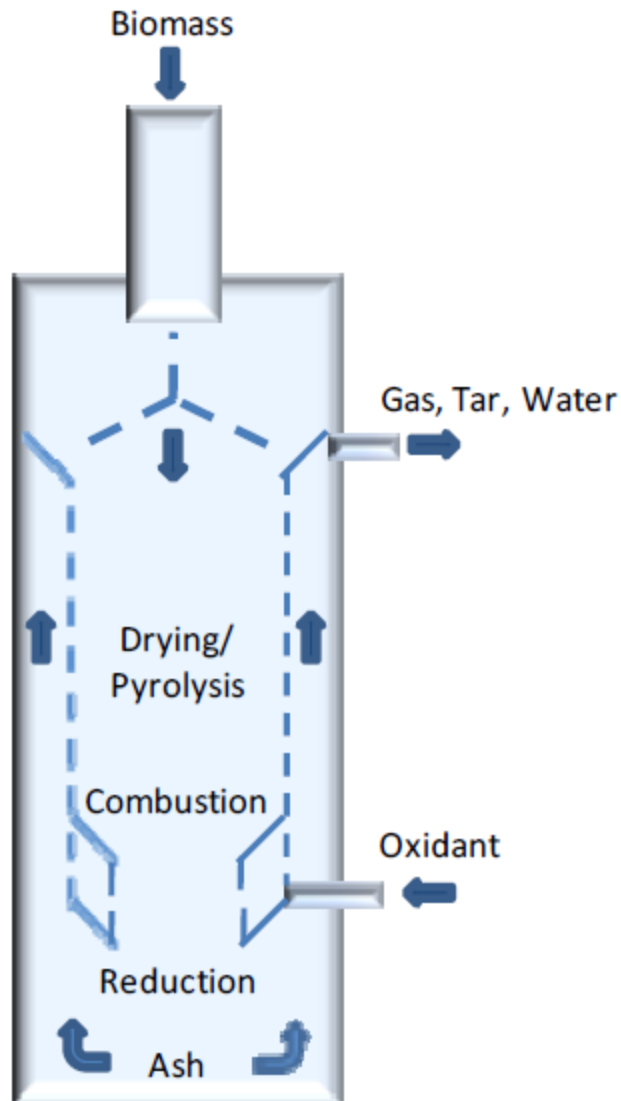
Αεριοποίηση με σταθερή κλίνη ανοδικής ροής(Updraft Gasification)

Οι αεριοποιητές σταθερής κλίνης (updraft) είναι γνωστοί επίσης ως αεριοποιητές αντιρροής. Αποτελούν τον παλαιότερο και απλούστερο τύπο αεριοποιητή, ο οποίος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται στην αεριοποίηση λιθάνθρακα (Εικόνα 3.3.1). Το προϊόν για την διεργασία της αεριοποίησης τροφοδοτείται στην κορυφή του αντιδραστήρα, ενώ στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα υπάρχει μια σχάρα, η οποία υποστηρίζει την κλίνη. Ο αέρας ή οξυγόνο ή υδρατμοί εισάγονται κάτω από τη σχάρα και μεταφέρονται προς τα πάνω διαμέσου της κλίνης. Πλήρης καύση του κωκ λαμβάνει χώρα στο κάτω μέρος της κλίνης απελευθερώνοντας διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα, καθώς και υδρατμό. Τα θερμά αυτά αέρια ($\sim 1,000^{\circ}\text{C}$) περνούν διαμέσου της κλίνης που βρίσκεται από πάνω, ανάγονται σε

υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα, και τελικά ψύχονται στους 750°C. Προχωρώντας προς τα πάνω μέσα στον αντιδραστήρα, το υδρογόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα πυρολύουν το προϊόν προς αεριοποίηση που κατέρχεται και όσο προχωρά ακόμα πιο πάνω μέσα στον αντιδραστήρα ξηραίνεται, εγκαταλείποντας τον αντιδραστήρα σε χαμηλότερη θερμοκρασία (~500°C). (Bridgwater & Evans, 1993).

Τα πλεονεκτήματα, της αεριοποίησης με ροή αερίου ρεύματος προς τα πάνω είναι:

- Απλή, χαμηλού κόστους διεργασία.
- Δυνατότητα για διαχείριση βιοστερεών και βιομάζας, με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και ανόργανες ουσίες, όπως π.χ. τα αστικά στερεά απόβλητα.
- Δοκιμασμένη τεχνολογία. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου αεριοποίησης είναι:
- Το παραγόμενο αέριο περιέχει 10 – 20% κ.β. πίσσα (tar) και κατά συνέπεια απαιτείται εκτεταμένος καθαρισμός, πριν την χρήση του σαν καύσιμο ή αέριο σύνθεσης (Bridgwater & Evans, 1993).



Εικόνα 3.3.2 Αεριοποιητής (downdraft) (Πηγή:Gikas,2014)

Αεριοποίηση με σταθερή κλίνη καθοδικής ροής (Downdraft Gasification)

Γνωστή και ως αεριοποίηση ομορροής. Αυτός ο τύπος αεριοποιητή έχει την ίδια μηχανική διάταξη με τον αεριοποιητή ροής αερίου ρεύματος προς τα πάνω, με τη διαφορά ότι το οξειδωτικό μέσο και τα παραγόμενα αέρια ρέουν προς τα κάτω με την ίδια δηλαδή κατεύθυνση ροής του προϊόντος προς αεριοποίηση (βιοστερεά, βιομάζα, κλπ.) (Εικόνα 3.3.2). Το προϊόν με χαμηλή περιεκτικότητα υγρασίας (< 20%) και αέρα ή οξυγόνου αναφλέγονται στη ζώνη αντιδράσεων στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα. Η φλόγα προωθεί την μετατροπή του προϊόντος στη ζώνη αυτή του αντιδραστήρα, αφήνοντας ένα προϊόν 5% με 15% κωκ και

καυτά αερία. Το μείγμα των αερίων ρέει προς τα κάτω και αντιδρά με το κωκ σε θερμοκρασίες μεταξύ 800°C και 1,200°C, παράγοντας περισσότερο μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, ενώ τα παραγόμενα αέρια ψύχονται σε θερμοκρασίες κάτω των 800°C. Τέφρα και κωκ, που δεν έχουν μετατραπεί, περνούν μέσα από τη σχάρα στον πυθμένα της κλίνης και διατίθενται προς απόρριψη (Bridgwater & Evans, 1993).

Τα πλεονεκτήματα της αεριοποίησης, με ροή αερίου ρεύματος προς τα κάτω είναι:

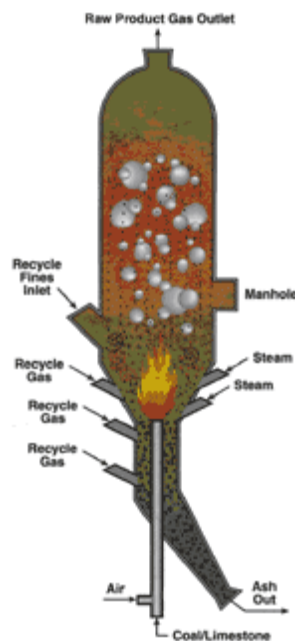
- Μέχρι και το 99.9% της πίσσας που σχηματίζεται καταναλώνεται με αποτέλεσμα, να απαιτείται ελάχιστος ή και καθόλου καθαρισμός της πίσσας.
- Μεταλλικά στοιχεία παραμένουν στο κωκ και στην τέφρα, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για διαχωρισμό με κυκλώνα.
- Δοκιμασμένη, απλή και χαμηλού κόστους διεργασία.

Τα μειονεκτήματα της αεριοποίησης με ροή αερίου ρεύματος προς τα κάτω είναι:

- Απαιτείται ξήρανση της τροφοδοσίας, έτσι ώστε η περιεκτικότητα σε υγρασία να είναι κάτω του 20% .
- Το αέριο σύνθεσης, που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα, βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα να απαιτείται ένα δευτερεύον σύστημα ανάκτησης θερμότητας .
- Το 4% – 7% του άνθρακα της τροφοδοσίας δεν μετατρέπεται.

Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized Bed)

Οι περισσότεροι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης που βρίσκονται υπό ανάπτυξη, υιοθετούν έναν εκ των δύο τύπων: Ο πρώτος τύπος είναι ο αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδας και ο δεύτερος είναι ο αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας (CBF).



Εικόνα 3.3.3 Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδας (Bubbling Fluidized-Bed) (Πηγή: Ciferno and Marano, 2002)

Ένας αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδας αποτελείται από ψιλά αδρανή σωματίδια άμμου ή αλούμινας, τα οποία επιλέγονται με βάση το μέγεθος, την πυκνότητα και τα θερμικά τους χαρακτηριστικά. Καθώς όλο και περισσότερο αέριο (οξυγόνο, αέρας ή υδρατμός) ωθείται διαμέσου των αδρανών σωματιδίων, επιτυγχάνεται ένα σημείο όπου η δύναμη τριβής μεταξύ των σωματιδίων και του αερίου αντισταθμίζει το βάρος των στερεών σωματιδίων. Σ' αυτό το σημείο σχηματίζονται «φυσαλίδες» στη κλίνη, και η ροή του αερίου γίνεται μέσω καναλιών, με συνέπεια τα σωματίδια να παραμένουν στον αντιδραστήρα. Τότε η κλίνη βρίσκεται σε «κατάσταση βρασμού» ("boiling state") (Craig et al., 1996). Τα σωματίδια σε ρευστοποιημένη κατάσταση τείνουν να τεμαχίζουν το προϊόν που τροφοδοτείται στην κλίνη και εξασφαλίζουν αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας σ' όλη την έκταση του αντιδραστήρα. Η Εικόνα 3.3.3 παρουσιάζει μια τέτοια κλίνη σε «κατάσταση βρασμού».

Τα πλεονεκτήματα της αεριοποίησης, σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης φουσαλίδας είναι τα εξής (Ciferno and Marano, 2002):

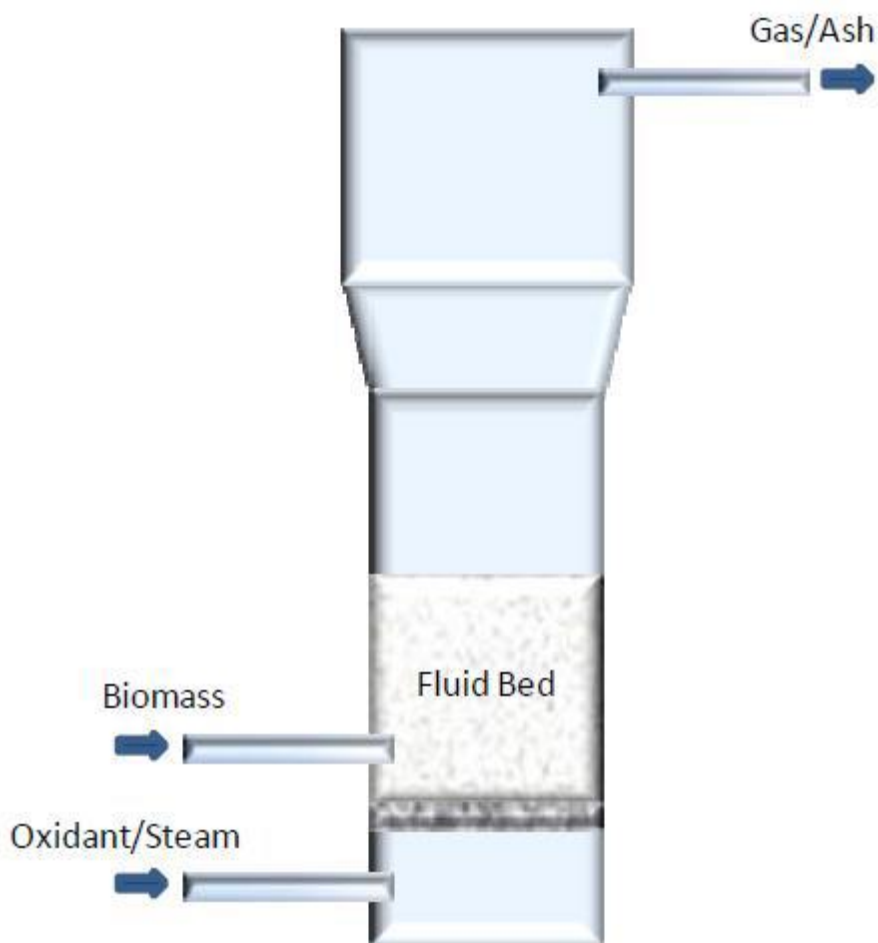
- Παράγει ένα ομοιόμορφης σύστασης αέριο.
- Παρουσιάζει μια σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας σ' όλη την έκταση του αντιδραστήρα.
- Έχει τη δυνατότητα να δεχθεί ένα ευρύ φάσμα μεγεθών σωματιδίων καυσίμου, συμπεριλαμβανομένου των πολύ ψιλών.
- Παρέχει υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας μεταξύ αδρανών υλικών, καυσίμου και αερίου.
- Επιτυγχάνονται υψηλές μετατροπές, ταυτόχρονα με χαμηλή ποσότητα πίσσας και χαμηλή ποσότητα άνθρακα που δεν έχει μετατραπεί.

Ένα μειονέκτημα της αεριοποίησης σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης φουσαλίδας είναι το εξής:

- Μπορεί να προκύψει, λόγω μεγάλου μεγέθους φουσαλίδων, παράκαμψη του αερίου διαμέσου της κλίνης.

Αεριοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας (Circulating Fluidized– Bed)

Οι αεριοποιητές συγκεκριμένου τύπου (Εικόνα 3.3.4) λειτουργούν σε ταχύτητες αερίου υψηλότερες από αυτή του ελάχιστου σημείου ρευστοποίησης, με αποτέλεσμα την παράσυρση των σωματιδίων στο αέριο ρεύμα εξόδου. Το αέριο μαζί με τα σωματίδια που συμπαρασύρει, εξέρχεται από την κορυφή του αντιδραστήρα. Τα σωματίδια διαχωρίζονται από το υπόλοιπο αέριο ρεύμα σ' έναν κυκλώνα και επιστρέφουν στον αντιδραστήρα.



Εικόνα 3.3.4 Αεριοποιητής (CBF) (Πηγή:Gikas,2014)

Τα πλεονεκτήματα αεριοποίησης, σε ρευστοποιημένη κλίνη κυκλοφορίας είναι (Ciferno and Marano, 2002):

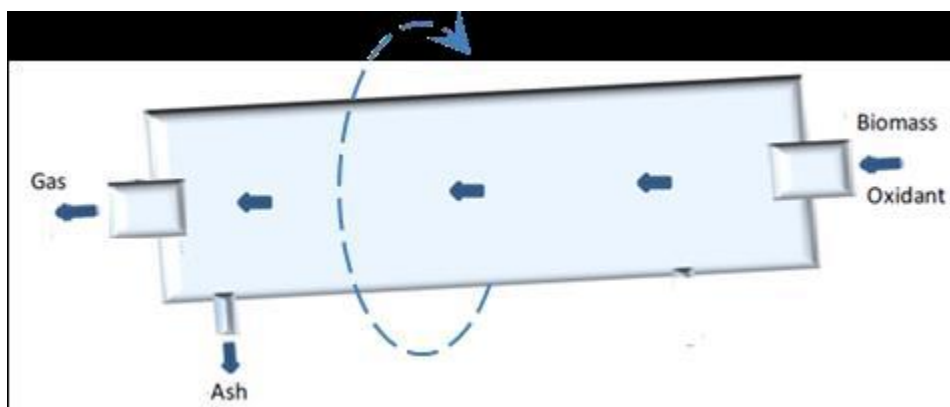
- Κατάλληλη για ταχείες αντιδράσεις.
- Δυνατότητα υψηλών ρυθμών μεταφοράς θερμότητας εξαιτίας της υψηλής θερμοχωρητικότητας του υλικού της κλίνης.
- Επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μετατροπής, ταυτόχρονα με χαμηλή ποσότητα πίσσας και χαμηλή ποσότητα άνθρακα που δεν έχει μετατραπεί.

Τα μειονεκτήματα αεριοποίησης σε ρευστοποιημένη κλίνη κυκλοφορίας είναι τα εξής (Bridgwater & Evans, 1993):

- Δημιουργείται διαβάθμιση θερμοκρασίας στην κατεύθυνση ροής του στερεού.
- Η ανταλλαγή θερμότητας είναι λιγότερο αποδοτική, απ' ότι στην αεριοποίηση με ρευστοποιημένη κλίνη φυσαλίδας.

Αεριοποίηση με την τεχνολογία περιστρεφόμενου τυμπάνου(Rotary drum)

Οι αεριοποιητές περιστρεφόμενου τυμπάνου υπερυψηλής θερμοκρασίας (UHT) (Εικόνα 3.3.5) χρησιμοποιούνται κυρίως για την αεριοποίηση πρωτοβάθμιων εσχαρισμένων βιοστερεών (PFSS). Έχουν εφαρμοστεί για την διεργασία της αεριοποίησης σε διάφορα στάδια (πειραματικές, πιλοτικές εφαρμογές κλπ), όπως επίσης και σε διάφορες κλίμακες. Οι θερμοκρασίες που λαμβάνουν χώρα στους συγκεκριμένους τύπους αεριοποιητών είναι από 800 έως 1,200°C (Gikas & Stedman, 2011).



Εικόνα:3.3.5 (Rotary Drum) (Πηγή:Gikas, 2014)

Κάποια από τα πλεονεκτήματα, και μειονεκτήματα που έχουν αποδοθεί είναι τα εξής (Gikas & Stedman,2011):

Πλεονεκτήματα:

- Το παραγόμενο αέριο (syngas) είναι υψηλής ποιότητας.
- Σε συνδυασμό με πλήρη απουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου υπάρχει εξάλειψη από διοξίνες και φουράνια στο αέριο, όπως επίσης εξάλειψη πίσσας.
- Αρκετά μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από την

προαπαιτούμενη που χρειάζεται για να λειτουργήσει.

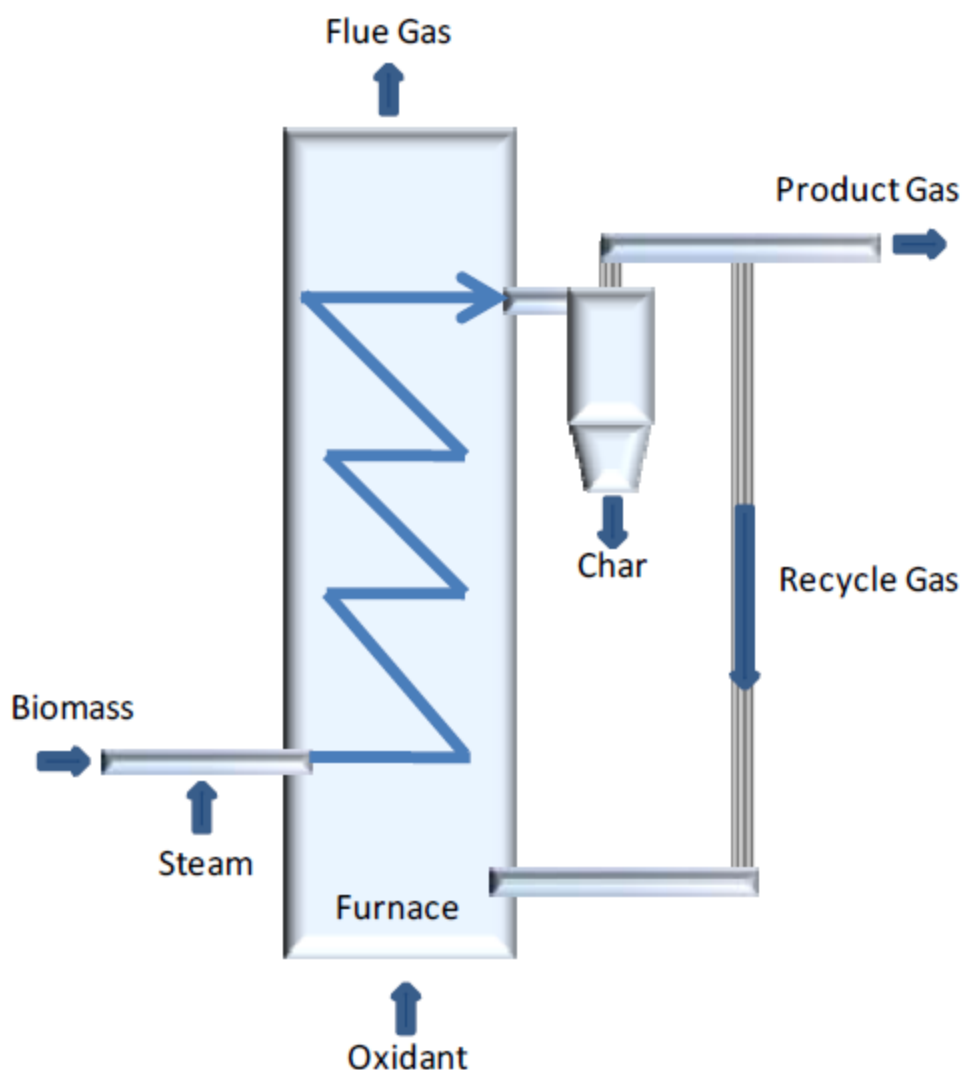
- Μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την διαχείριση των βιοστερεών, με παράλληλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μειονεκτήματα:

- Απαιτήσεις υψηλής ηλεκτρικής ενέργειας, για την επίτευξη υψηλών λειτουργικών θερμοκρασιών. (Gikas et al., 2010).

Αεριοποίηση ροής με παράσυρση (entrained flow – EF)

Οι αεριοποιητές ροής με παράσυρση (Εικόνα 3.3.6), τυπικά λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες 1,200 – 1,500°C, στις οποίες η τροφοδοσία μετατρέπεται σχεδόν πλήρως σε αέριο σύνθεσης ακόμη και για μικρούς χρόνους παραμονής μερικών μόλις δευτερολέπτων. Σ' έναν αεριοποιητή επικαθίσεων σκουριάς, τα συστατικά που σχηματίζουν την τέφρα τήκονται μέσα στον αεριοποιητή. Αυτά τα τηγμένα σωματίδια στερεοποιούνται πάνω στα πιο ψυχρά τοιχώματα και σχηματίζουν μια στρώση επικαθίσεων, η οποία είναι σε στερεή κατάσταση κοντά στο τοίχωμα και σε υγρή στην εσωτερική της πλευρά. Αυτές οι επικαθίσεις σκουριάς χρησιμεύουν ως ένα προστατευτικό στρώμα για το τοίχωμα. Η υγρή σκουριά απομακρύνεται από το κάτω μέρος του αεριοποιητή. Γενικά, ένα «καθαριστικό» (fluxing) υλικό προστίθεται, προκειμένου να παραχθεί υγρή σκουριά με το σωστό ιξώδες στην προαπαιτούμενη θερμοκρασία. (Bridgwater & Evans, 1993).



Εικόνα 3.3.6: Αντιδραστήρας (Entrained Flow) (Πηγή:Gikas,2014)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι αεριοποιητές ροής με παράσυρση (EF) λειτουργούν σε πιέσεις 20 με 50 bar με καθαρό οξυγόνο και με δυναμικότητα της τάξης μερικών εκατοντάδων MW. Η παραγωγή αερίου σύνθεσης, βασισμένη σε αεριοποίηση επικαθίσεων EF, έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

- Παραγωγή αερίου σύνθεσης, σε μεγάλη κλίμακα και με υψηλή απόδοση.

Υπάρχουν αρκετοί εμπορικοί αεριοποιητές EF που λειτουργούν σε μεγάλη κλίμακα ~700 MW. Οι αεριοποιητές αυτού του τύπου λειτουργούν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες $1,200^{\circ}\text{C} - 1,500^{\circ}\text{C}$, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το προϊόν μετατρέπεται πλήρως.

Πλεονεκτήματα:

- Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στον αεριοποιητή, το αέριο σύνθεσης είναι απολύτως καθαρό από οργανικές ακαθαρσίες π.χ. πίσσα, και μπορεί εύκολα να καθαριστεί από μικρά ίχνη ανόργανων ακαθαρσιών με συμβατικές τεχνολογίες.

Μειονεκτήματα:

Η θερμοκρασία και η πίεση λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου αεριοποιητή είναι υψηλότερη των άλλων τύπων, άρα αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγαλύτερου ενεργειακού κόστους. (Bridgwater & Evans, 1993).

3.4 Δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τεχνολογίες αεριοποίησης

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την διεργασία της αεριοποίησης, έχουμε παραγωγή μείγματος αερίων το οποίο είναι γνωστό ως αέριο σύνθεσης (Syngas). Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης μπορεί να αξιοποιηθεί για την τροφοδοσία ηλεκτροκινητήρα εσωτερικής καύσης, για την κίνηση ατμοστρόβιλου και επίσης για την κίνηση αεριοστρόβιλου και ατμοστρόβιλου σε συνδυασμένο κύκλο(IGCC) (Kumabe et al., 2007).

3.4.1. Καθαρισμός-Ψύξη Syngas

Το αέριο σύνθεσης, πριν εισέρθει σε οποιονδήποτε ηλεκτροκινητήρα, για λόγους ομαλής και αξιόπιστης συνεχούς λειτουργίας, είναι απαραίτητο να υποβληθεί σε κάποιες διεργασίες, όπως οι διεργασίες καθαρισμού και ψύξης. Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά δύο παραδείγματα διαφορετικών διαδικασιών. Η πρώτη είναι από την εταιρία Agroenergy και η δεύτερη της εταιρίας Pyromex.

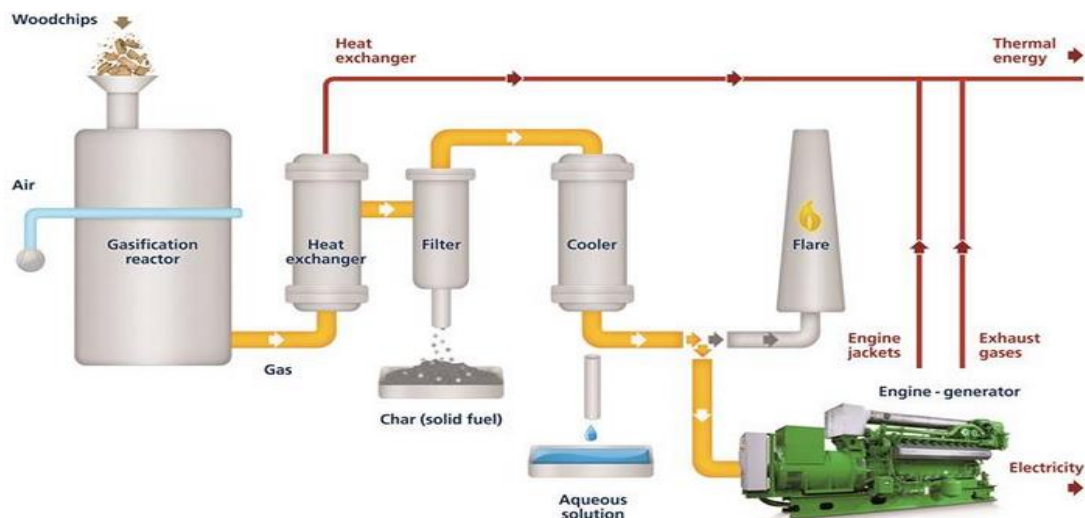
1) Καθαρισμός-Ψύξη Syngas: Agroenergy

Αναλυτικά, οι διεργασίες αυτές συμπεριλαμβάνουν τα εξής στάδια (<http://www.ge-energy.com/>):

1. Ψύξη του αέριου πριν από την εισαγωγή του στον κινητήρα.
2. Εξαγωγή όλων των σωματιδίων και υπολειμμάτων πίσσας από το αέριο.
3. Συμπύκνωση της περίσσειας υγρασίας στο αέριο.

Επίσης περιλαμβάνει επιγραμματικά κάποια άλλα στάδια όπως:

1. Απομάκρυνση της σκόνης σε υψηλή θερμοκρασία με κυκλώνα υψηλής απόδοσης.
2. Ψύξη και δέσμευση της πίσσας με την χρήση οργανικού διαλύτη ή άλλων μέσων.
3. Διαχωρισμός αερίου /διαλύτη
4. Τελική ψύξη του αερίου και απομάκρυνση συμπυκνωμάτων νερού.
5. Τελικό φιλτράρισμα με ειδικό φίλτρο.
6. Φίλτρηση ασφάλειας, πριν την είσοδο στον κινητήρα (Σχήμα3.4.1).



Σχήμα 3.4.1 Στάδια διεργασίας καθαρισμού, ψύξης (syngas)

(Πηγή: <http://www.ge-energy.com/>)

Για την διαδικασία καθαρισμού του syngas, δηλαδή την απομάκρυνση σωματιδίων και υπολειμματικών πιτσών, χρησιμοποιούνται μη-τοξικοί διαλύτες. Οι οργανικοί διαλύτες χρησιμοποιούνται σε κλειστό κύκλωμα εντός της μονάδας καθαρισμού του αερίου. Κατά την διάρκεια των εργασιών συντήρησης της μονάδας, οι ποσότητες από τις πίσσες καθώς και κεκορεσμένος διαλύτης θα πρέπει να απομακρυνθούν από την μονάδα. Τα συγκεκριμένα προϊόντα θεωρούνται απόβλητα και πρέπει να αντιμετωπίζονται σύμφωνα με τις νόμιμες τεχνικές διαχείρισης (<http://www.ge-energy.com/>).



Εικόνα 3.4.1.2 Πύργος καθαρισμού – ψύξης Syngas: (Pyromex) (Πηγή:Gikas, 2013)

3) Καθαρισμός-Ψύξη Syngas: Pyromex

Το αέριο σύνθεσης, μετά της εξόδου του από τον αντιδραστήρα στους 1,150°C, διέρχεται σε δύο ξεχωριστές μονάδες χημικής επεξεργασίας σχήματος πύργων (Εικόνα 3.4.1.2) ειδικά στεγανοποιημένες, οι οποίες περιέχουν δυο τύπους χημικών διαλυμάτων. Η πρώτη μονάδα περιέχει ένα όξινο διάλυμα και η δεύτερη ένα καυστικό. Η διεργασία του πρώτου διαλύματος γίνεται με καθοδική ροή. Το αέριο σύνθεσης εισέρχεται από την κορυφή του πύργου και αναμιγνύεται με το διάλυμα, όπου στη συνέχεια ρέουν μαζί καθοδικά. Το αέριο μετακινείται προς τα πάνω μέσω ενός συστήματος καθαρισμού, το οποίο λειτουργεί με ανοδική πορεία αντίθετη της καθοδικής ροής ώστε το αέριο με το διάλυμα να αναμιχθούν στον μέγιστο δυνατό βαθμό. Το μείγμα αποτελούμενο από αέριο σύνθεσης και όξινο διάλυμα υπόκειται σε μία διαδικασία επανακυκλοφορίας στις κεφαλές ψεκασμού του πύργου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μίας αντλίας επανακυκλοφορίας, αποτελούμενης από σωλήνες υψηλής πίεσης συνδεδεμένους με τις κεφαλές ψεκασμού. Το αέριο σύνθεσης διαχωρίζεται από το όξινο διάλυμα, μέσω των κεφάλων ψεκασμού με τις διαδικασίες που προαναφέρθηκαν. Στη συνέχεια, το αέριο σύνθεσης διέρχεται σε μια δεύτερη μονάδα πύργου, η οποία περιέχει ένα καυστικό διάλυμα καθαρισμού. Το τελικό στάδιο καθαρισμού επιτυγχάνει την μείωση της θερμοκρασίας του αερίου στους 50°C. Η θερμότητα από όλες τις λειτουργίες, που λαμβάνουν χώρα στους πύργους, απομακρύνεται είτε με την μέθοδο της αερόψυξης, είτε με την μέθοδο της υδρόψυξης (μέσω υγρών αποβλήτων).

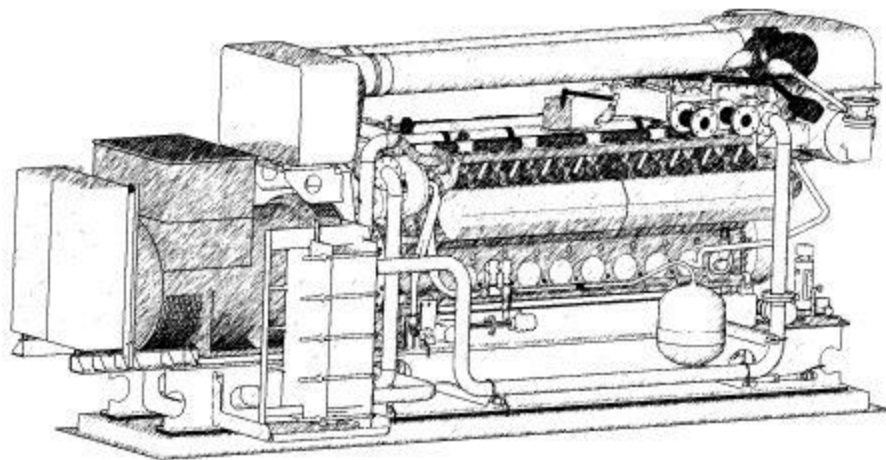
Τέλος, το καθαρό αέριο (Syngas) διέρχεται σε μία συσκευή ξήρανσης αερίου καυσίμου, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν κατάλοιπα νερού. Το αέριο σύνθεσης εισέρχεται σε μια ειδικά τροποποιημένη δεξαμενή συμπίεσης, ώστε να λάβει τις απαραίτητες προϋποθέσεις πίεσης που χρειάζεται, σύμφωνα με τους κανονισμούς πίεσης που προβλέπονται για την ομαλή λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα (Gikas, 2013).

3.4.2. Τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από αέριο σύνθεσης

3.4.2.1. Ηλεκτροκινητήρες εσωτερικής καύσης

Οι δύο τύποι ηλεκτροκινητήρων εσωτερικής καύσης, που χρησιμοποιούνται για την κίνηση ηλεκτρογεννητριών ώστε να παραχθεί παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, είναι οι τετράχρονοι μηχανές με σπινθηριστή (κύκλος Otto) και οι μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση (κύκλος Diesel) (Σχήμα 3.4.2.1). Τα κύρια μηχανικά μέρη των μηχανών κύκλου Otto και Diesel είναι τα ίδια. Κι οι δύο τύποι χρησιμοποιούν ένα κυλινδρικό θάλαμο καύσης κατά μήκος του οποίου κινείται ένα κατάλληλα εφαρμοσμένο έμβολο. Το έμβολο συνδέεται σε έναν στροφαλοφόρο άξονα, που μετασχηματίζει τη γραμμική κίνηση του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο σε περιστροφική κίνηση στο στροφαλοφόρο άξονα. Τόσο οι μηχανές κύκλου Otto, όσο και οι τετράχρονοι μηχανές Diesel ολοκληρώνουν έναν κύκλο λειτουργίας σε τέσσερις κινήσεις του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο. Οι κινήσεις αυτές περιλαμβάνουν:

- 1) Εισαγωγή του αέρα (ή του μίγματος αέρα-καυσίμου) στον κύλινδρο.
- 2) Συμπίεση με καύση του καυσίμου.
- 3) Επιτάχυνση του εμβόλου από τη δύναμη της καύσης (κίνηση ισχύος).
- 4) Αποβολή των προϊόντων της καύσης από τον κύλινδρο.



Σχήμα 3.4.2.1(Πηγή: <https://powergen.gepower>)

Η κύρια διαφορά μεταξύ των κύκλων Otto, και Diesel είναι η μέθοδος της καύσης του καυσίμου. Στον κύκλο Otto χρησιμοποιείται ένας σπινθηριστής για την ανάφλεξη ενός έτοιμου μίγματος αέρα καυσίμου, που εισάγεται στον κύλινδρο. Από την άλλη, μια μηχανή Diesel συμπιέζει τον αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο σε υψηλή πίεση, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του στα επίπεδα της θερμοκρασίας ανάφλεξης του καυσίμου, το οποίο εγχέεται υπό υψηλή πίεση (<http://www.cres.gr/>).

Τύποι ηλεκτροκινητήρων

Jenbacher type J 316

Ο κινητήρας **Jenbacher type J 316** (Εικόνα 3.4.2.3) μπορεί να λειτουργήσει είτε με 100% φυσικό αέριο, είτε με 100% Syngas. Τα απαέρια συμμορφώνονται με τους κανονισμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Κατά την διάρκεια του start –up, οι αρχικές ποσότητες του αερίου καίγονται σε καυστήρα μέχρι την αποκατάσταση της κατάλληλης ποιότητας του αερίου σύνθεσης και το ξεκίνημα του κινητήρα (<http://www.ge-energy.com/>).

Jenbacher type 3



Εικόνα 3.4.2.2 Jenbacher type J 316 (Πηγή: <http://www.ge-energy.com/>)

Οι αποδόσεις που ορίζονται από τον κατασκευαστή είναι:

Jenbacher Type 3	J316
Electrical Output (kW)	835
Energy Input (kW)	2146
NOx mg/Nm³ (5% O₂)	500
Thermal Efficiency	50.1%
Electrical Efficiency	38.9%
Total Efficiency	89.1%

Πινάκας 3.4.2.1 Αποδόσεις Κατασκευαστή (Πηγή:<https://powergen.gepower>)

Ηλεκτροκινητήρες GE-JMS 312 και MWM

Οι συγκεκριμένοι τύποι κινητήρων εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν εναυστήρες (μπουζί) για την ανάφλεξη του αερίου σύνθεσης (Εικόνα 3.4.2.2.3). Είναι ειδικά σχεδιασμένοι για αλλαγές στην εισαγωγή ροής του αερίου, χρησιμοποιώντας υπερσυμπιεστές (εξαρτήματα τα οποία δημιουργούν υψηλές συνθήκες συμπίεσης) και κάποιες ρυθμίσεις από ειδικές βαλβίδες, προκειμένου να επιτευχθεί syngas με υψηλή περιεκτικότητα υδρογόνου σε καθορισμένες

αναλογίες $H_2:CO$. Κάποιες βέλτιστες αποδόσεις αναλογιών σε συνθήκες λειτουργίας είναι 1:1 έως 2:1. Οι κινητήρες, εξαρτώμενοι από την νομοθεσία όσον αφορά τους ρύπους των απαερίων στο σύστημα εξαγωγής των απαερίων, χρησιμοποιούν έναν ειδικό καταλυτικό μετατροπέα τύπου (SCR). Ο καταλυτικός μετατροπέας διαχειρίζεται τη ποσότητα NO_x και CO που προκύπτει στα απαέρια. Μετά τον (SCR), το αέριο διέρχεται μέσω ενός θερμικού εναλλάκτη για την ανάκτηση της χαμένης ενέργειας από τα απαέρια, τα οποία στην συνέχεια επιστρέφουν στην εισαγωγή των κινητήρων για επανάκαυση. Οι συγκεκριμένοι τύποι κινητήρων είναι καινούριας τεχνολογίας και με τον τρόπο λειτουργίας τους από την εισαγωγή μέχρι και την επανάκαυση των απαερίων, επιτυγχάνουν την μέγιστη εξοικονόμηση του καύσιμου αερίου, ομαλότερη λειτουργία και αύξηση ιπποδύναμης του κινητήρα(<http://www.ge-energy.com/>).



**Εικόνα 3.4.2.2.3 Ηλεκτροκινητήρας GE-JMS 312 (Πηγή:
<https://powergen.gepower>)**

Οι αποδόσεις που ορίζονται από τον κατασκευαστή είναι:

Jenbacher Type 3	J312
Electrical Output (kW)	405
Energy Input (kW)	1,015
Nox mg/Nm ³ (5% O ₂)	500
Thermal Efficiency	49.1%
Electrical Efficiency	39.9%
Total Efficiency	89.0%

Πίνακας 3.4.2.2 Αποδόσεις GE-JMS 312 (Πηγή: <https://powergen.gpower>)

Ηλεκτροκινητήρας GE-JMS 320

Η διαφορά του συγκεκριμένου τύπου με τους προηγούμενους (Εικόνα 3.4.2.2.4), είναι τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν το μέγεθος του κινητήρα. Ο GE-JMS 320 είναι ένας κινητήρας με 20 κυλίνδρους, σε αντίθεση με τον GE- 316, ο οποίος αποτελείται από 16 κυλίνδρους, και τον GE -312, ο οποίος αποτελείται από 12 κυλίνδρους. Είναι ένας κινητήρας μεγαλύτερης ισχύος, μεγαλύτερης κατανάλωσης, αλλά αυτομάτως και μεγαλύτερης απόδοσης όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (<https://powergen.gpower>).



Εικόνα 3.4.2.2.4 GE-JMS 320 (Πηγή:powergen.gepower)

Οι αποδόσεις που ορίζονται από τον κατασκευαστή είναι:

Jenbacher Type 3	J320
Electrical Output (kW)	1,067
Energy Input (kW)	2,697
NOx mg/Nm³ (5% O₂)	500
Thermal Efficiency	49.4%
Electrical Efficiency	39.6%
Total Efficiency	89.0%

Πίνακας 3.4.2.3 Αποδόσεις J320 (Πηγή:https://powergen.gepower)

Ηλεκτροκινητήρες Stirling “SD4-E” [53]

Ο κινητήρας έχει σχεδιαστεί κατάλληλα για εφαρμογές λειτουργίας με αέριο καύσιμο (Syngas). Εξασφαλίζει απόδοση ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 35 kW ([https:// Stirling engines 2014](https://Stirling engines 2014)).



,Εικόνα 3.4.2.2.5 “Ηλεκτροκινητήρας Stirling SD4-E” [53] (Πηγή: <https://Stirling engines 2014>)

Οι αποδόσεις του κινητήρα που ορίζονται από τον κατασκευαστή είναι:

Stirling	“SD4-E” [53]
Electrical Output (kW)	35
Energy Input (kW)	200
NO _x	-
Thermal Efficiency	
Electrical Efficiency	17.5%
Total Efficiency	-

Πίνακας 3.4.2.4 Stirling “SD4-E” [53] (Πηγή: <https://Stirling engines 2014>)

Κάποια από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καύσης αέριου προϊόντος (Syngas), από την λειτουργία των ηλεκτροκινητήρων εσωτερικής καύσης, είναι (Gikas,2013):

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή απόδοση ανεξαρτήτως φορτίου.
- Σχετικά μικρό αρχικό κόστος ανά kW ηλεκτρικής ισχύος.

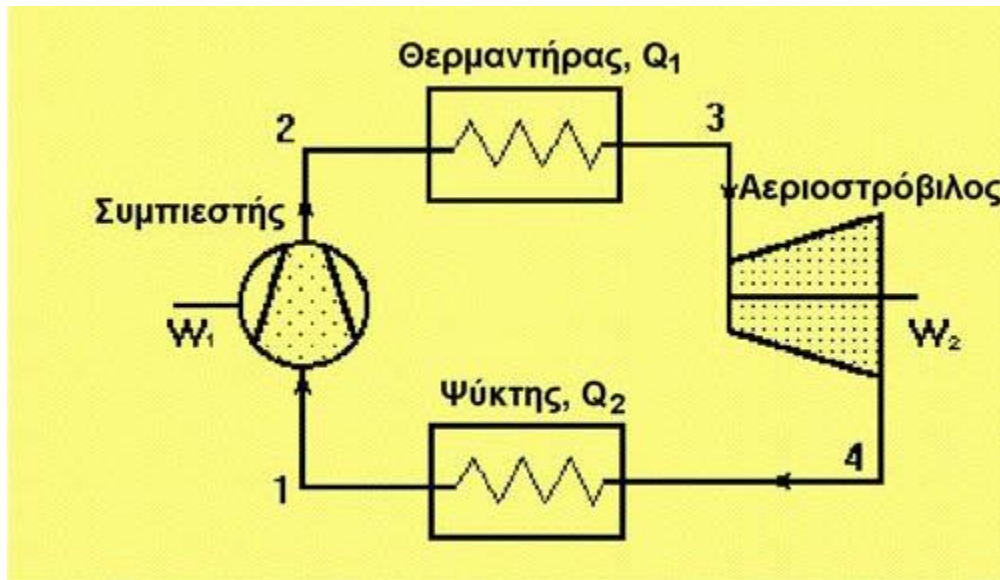
Μειονεκτήματα

- Υψηλή απόδοση ανεξαρτήτως φορτίου.
- Υψηλό κόστος συντήρησης.

3.4.2.2 Αεριοστρόβιλοι

Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούν τα θερμά αέρια που παράγονται άμεσα από την καύση. Ένα διάγραμμα λειτουργίας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (3.4.2.2). Το θερμό αέριο εκτονώνεται μέσα από τα πτερύγια του δρομέα του στροβίλου, αναγκάζοντας τα να κινηθούν. Ο θερμοδυναμικός κύκλος που σχετίζεται με την πλειοψηφία των αεριοστροβιλικών συστημάτων είναι ο κύκλος Brayton. Κατά την διεργασία του κύκλου, ο ατμοσφαιρικός αέρας που είναι το εργαζόμενο μέσο διέρχεται από τον στρόβιλο μόνο μία φορά. Οι θερμοδυναμικές

διεργασίες του κύκλου Brayton περιλαμβάνουν τη συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, την εισαγωγή και ανάφλεξη του καυσίμου και την εκτόνωση των θερμών απααερίων μέσω του στροβίλου. Η αναπτυσσόμενη ισχύς χρησιμοποιείται για την κίνηση του συμπιεστή και της ηλεκτρογεννήτριας (<http://www.cres.gr/>).



Σχήμα 3.4.2.2 Διάγραμμα λειτουργίας αεριοστρόβιλου (Πηγή: <http://www.cres.gr/>)

3.4.2.3 Τύποι Αεριοστρόβιλων General Electric (LM2500)

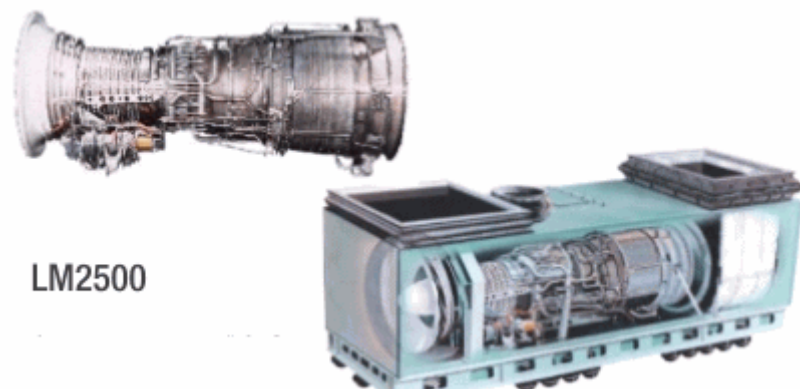
Οι συγκεκριμένοι τύποι αεριοστρόβιλων είναι σχεδιασμένοι κατάλληλα για εφαρμογές λειτουργίας με αέριο καύσιμο Syngas (https://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric).

Υπάρχουν τρεις τύποι LM2500. Ο πρώτος είναι ο LM2500, ο δεύτερος είναι LM2500 +, ο οποίος είναι τρίτης γενιάς, και ο τελευταίος τεχνολογίας-τέταρτης γενιάς LM2500+G4. Οι αποδόσεις για κάθε έναν ξεχωριστά είναι οι εξής:

1) Ο τύπος αεριοστρόβιλου LM2500 αποδίδει θερμική ισχύ της τάξης του 37%. Σε συνδυασμό με μια ηλεκτρική γεννήτρια παρέχει 24MW ηλεκτρικής ισχύος στα 60Hz με ωφέλιμη θερμική ισχύς 36%.

2) Η βελτιωμένη 3ης γενιάς LM2500 + έκδοση του στροβίλου αποδίδει ωφέλιμη θερμική ισχύς της τάξης του 39%. Σε συνδυασμό με μια ηλεκτρική γεννήτρια παρέχει 29MW ηλεκτρικής ισχύος στα 60Hz με ωφέλιμη θερμική ισχύς 38% σε συνθήκες ISO.

3) Η τελευταία 4ης γενιάς LM2500 + έκδοση G4 εισήχθη το Νοέμβριο του 2005 και αποδίδει ωφέλιμη θερμική ισχύ 39,3% (<https://www.ge.com/>).



Εικόνα 3.4.2.2.1 Αεριοστρόβιλος General Electric (Πηγή: <https://www.ge.com/>)

Τα πλεονεκτήματα, και μειονεκτήματα της τεχνολογίας καύσης αερίου προϊόντος (Syngas), με την τεχνολογία των αεριοστρόβιλων είναι τα εξής (<http://library.tce.gr>, siskos, 2014):

Πλεονεκτήματα

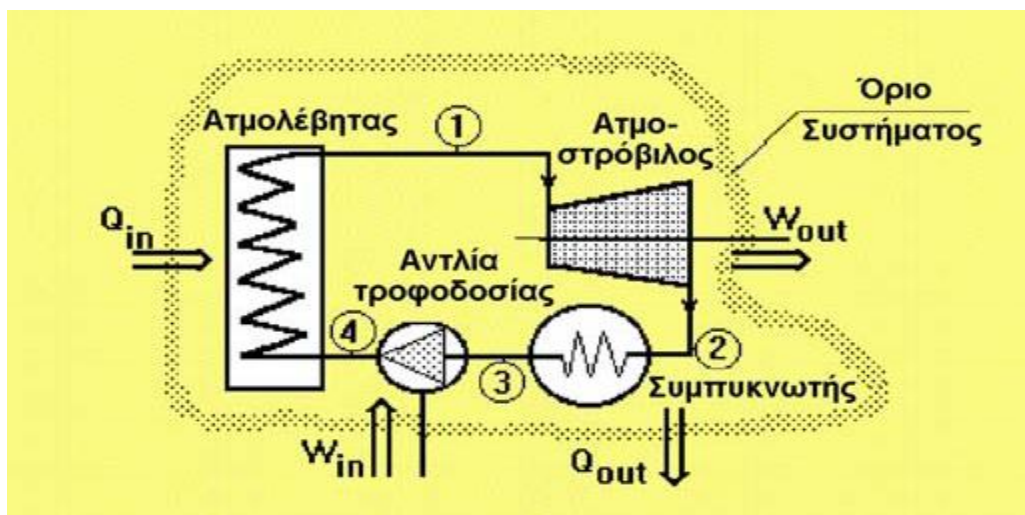
- Υψηλή αξιοπιστία.
- Σχετικά μικρό αρχικό κόστος ανά kW ηλεκτρικής ισχύος.
- Χαμηλές εκπομπές ρύπων.

Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος συντήρησης.
- Σχετικά χαμηλές ηλεκτρικές αποδόσεις.

Ατμοστρόβιλοι

Οι ατμοστρόβιλοι (τουρμπίνες) είναι κινητήριες μηχανές που χρησιμοποιούν ατμό υψηλής πίεσης για την παραγωγή κινητικής ενέργειας. Οι ατμοστρόβιλοι εξαρτώνται από κάποια χωριστή πηγή ενέργειας, διότι δεν μετατρέπεται άμεσα το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Απαιτούν μία πηγή ατμού υψηλής πίεσης, που παράγεται σε κάποιο λέβητα ή ατμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας. Ο θερμοδυναμικός κύκλος του ατμοστροβίλου είναι ο κύκλος Rankine. Ο κύκλος Rankine είναι ο βασικός κύκλος των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, και συνίσταται κατ' αρχήν από μια πηγή θερμότητας (λέβητας), που μετατρέπει το νερό σε ατμό υψηλής πίεσης. Ο ατμός ρέει μέσα από το στρόβιλο, παράγει μηχανική ισχύ και μπορεί να είναι υγρός, ξηρός, κορεσμένος ή υπέρθερμος. Όταν εξέρχεται από τον στρόβιλο συμπυκνώνεται και επιστέφει στο λέβητα για να επαναληφθεί η διαδικασία (Σχήμα3.4.2.3) (<http://www.cres.gr/>).



Σχήμα 3.4.2.3 Στάδια συστήματος ατμοστροβίλου (Πηγή:<http://www.cres.gr>)

Τύποι Ατμοστρόβιλων:

Ένα μοντέλο ατμοστρόβιλου της σειράς SST από την εταιρία Siemens είναι ο SST-300 (Εικόνα 3.4.2.3.1).



Εικόνα 3.4.2.3.1 Siemens Steam Turbine SST- 300(Πηγή:
<http://www.enrgy.siemens.com>)

Κάποιες από τις αποδόσεις του ατμοστρόβιλου SST-300 είναι: α) Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο που καθορίζεται σε 50 MW, β) Οι συνθήκες του ατμού, οι οποίες καθορίζονται σε πιέσεις από 120 έως 1,740 bar, γ) Η θερμοκρασία έως 520°C (<http://www.enrgy.siemens.com>). Κάποια από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας καύσης αέριου προϊόντος με ατμοστρόβιλους είναι τα εξής (<http://library.tee.gr>, siskos 2014):

Πλεονεκτήματα

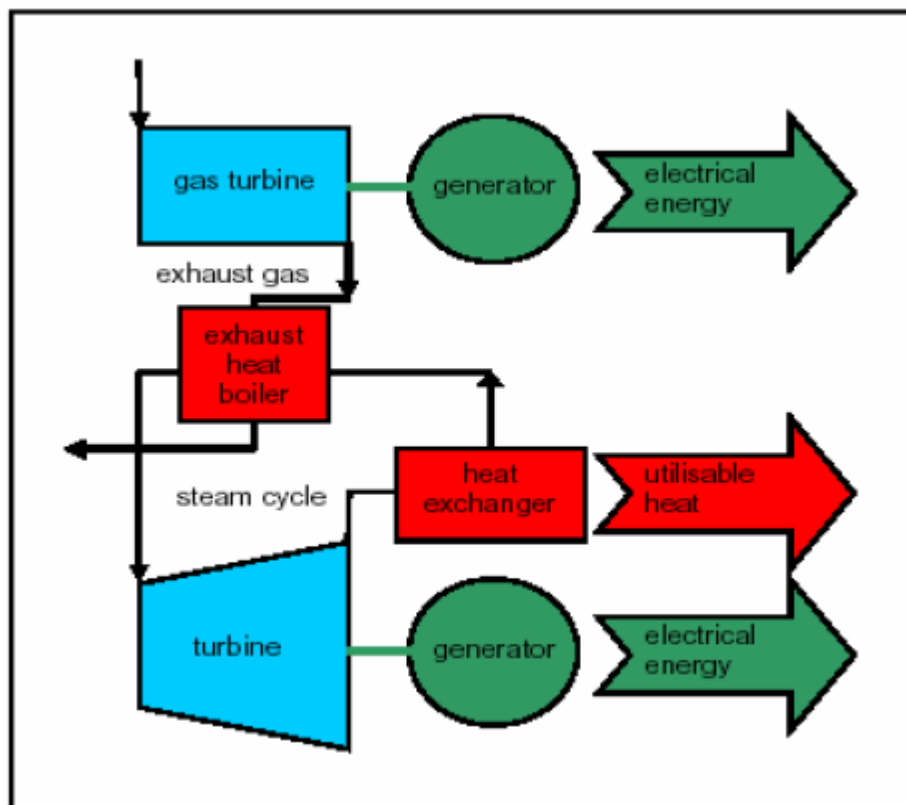
- Ευρέως δοκιμασμένη τεχνολογία.
- Ελαστικότητα στο μέγεθος της εγκατάστασης.

Μειονεκτήματα

- Χαμηλές ηλεκτρικές αποδόσεις.
- Υψηλό λειτουργικό κόστος.

3.4.2.4 Τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από (Syngas) με την ολοκληρωμένη αεριοποίηση συνδυασμένου κύκλου (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)

Το βασικό σύστημα λειτουργίας για την ηλεκτροπαραγωγή μέσω (IGCC) αποτελείται από έναν αεριοστρόβιλο, έναν ατμοστρόβιλο και στη συνέχεια τις ηλεκτρογεννήτριες (Σχήμα 3.4.2.4). Η συγκεκριμένη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αέριο σύνθεσης χρησιμοποιείται από μονάδες που απαιτούν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας (<http://www.ducentestanford, 2004>).



Σχήμα 3.4.2.4 Διάγραμμα λειτουργίας (IGCC) (Πηγή: <http://library.tee.gr>,siskos 2014)

Η πρώτη τέτοια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, στην οποία εφαρμόστηκε η τεχνολογία ολοκληρωμένης αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου, κατασκευάστηκε το 1993 στο Varnamo της Σουηδίας (Εικόνα 3.4.2.1) και παράγει 6MW ηλεκτρικής ισχύος και 9MW ωφέλιμης θερμικής ισχύος (<http://www.ducente.stanford>, 2004).



Εικόνα 3.4.2.4.1 Varnamo Σουηδία(Πηγή:<http://www.ducente.stanford>,2004)

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ηλεκτρική απόδοση

Μειονεκτήματα

- Κατάλληλα μόνο για μεγάλες εγκαταστάσεις.
- Υψηλό λειτουργικό κόστος, λόγω της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για τη συμπίεση του αέρα της αεριοποίησης (<http://library.tee.gr/siskos> 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΩΝ ΣΕ ΙΔΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

4.1 Πειραματικές εφαρμογές

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο έχουν χρησιμοποιηθεί δύο επιλεγμένα παραδείγματα πειραματικών εφαρμογών αεριοποίησης ιλύος από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Το πρώτο παράδειγμα (4.1.1) αφορά την πειραματική εφαρμογή αεριοποίησης πρωτοβάθμιων εσχαρισμένων βιοστερεών από την μονάδα επεξεργασίας λυμάτων στην πόλη Adelanto, CA, USA (Gikas, 2016). Η δεύτερη πειραματική εφαρμογή αεριοποίησης ιλύος από Ε.Ε.Λ έχει πραγματοποιηθεί στο Ε.Μ.Π, όπου για την συγκεκριμένη πειραματική εφαρμογή (Εικόνα 4.1.2) σχεδιάστηκε ένας αλλόθερμος εργαστηριακός αντιδραστήρας. Σε αυτή την πειραματική εφαρμογή επιλέχθηκε η διερεύνηση της επίδρασης του Θ_c , το οποίο είναι ο δείκτης ηλικίας της ιλύος, και αναλύεται στη συνέχεια διότι αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα σχεδιασμού, καθώς ορίζει το μέγεθός του αντιδραστήρα και την κατανάλωση ενέργειας (Vlyssides et al., 2007).

4.1.1 Πειραματική εφαρμογή Adelanto C,A USA

Για την πειραματική εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ένας πειραματικός αεριοποιητής περιστρεφόμενου τυμπάνου υπερυψηλής θερμοκρασίας, ο οποίος λειτούργησε σε δυο ξεχωριστές θερμοκρασίες αεριοποίησης. Η πρώτη θερμοκρασία ήταν στους 1,050°C και η δεύτερη στους 950°C. Σαν εισερχόμενο φορτίο, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 8.15kg πρωτοβάθμιων εσχαρισμένων βιοστερεών (PFSS) με περιεκτικότητα σε υγρασία 17%, τα οποία προεπεξεργάστηκαν από ένα τεμαχιστή ώστε να μειωθεί η διάμετρος τους κάτω από 2cm (Εικόνα 4.1.1). Επίσης, για την μέτρηση των παραγόμενων αέριων κατά τη διάρκεια των δύο δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ένας αναλυτής αερίων, ο οποίος κατέγραφε τα αποτελέσματα κάθε 3 min. Τέλος, η διάρκεια της πρώτης δοκιμής στους 1,050°C ήταν 32 min και της δεύτερης στους 950°C ήταν 37 min (Gikas, 2016).



Εικόνα 4.1.1. Αποτέλεσμα επεξεργασίας PFSS (Πηγή:Gikas, 2016)

Αεριοποιητής (Rotary drum)

Ο αεριοποιητής περιστρεφόμενου τυμπάνου, που χρησιμοποιήθηκε για πειραματική εφαρμογή (Εικόνα 4.1.1.2), είναι της εταιρίας Rygomex. Αποτελείται από ένα περιστροφικό κυλινδρικό (τύμπανο) φτιαγμένο κυρίως από κράμα χάλυβα, νικελίου, χρωμίου και κάποιων άλλων μετάλλων, το οποίο αντέχει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (Gikas, 2016).



Εικόνα 4.1.1.2 Πειραματικός Αεριοποιητής Rotary drum (Πηγή: Gikas, 2016)

Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Τα αποτελέσματα της πειραματικής εφαρμογής των δύο ξεχωριστών θερμοκρασιών αεριοποίησης είναι τα εξής:

Run	PF-S solids (kg)	Moisture (%)	Temp (°C)	CO (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	H ₂ (%)	Other gases (%)	Ash (kg)
Run1	8.15	17	1,050	29.87	2.63	1.79	62.96	2.75	0.52
Run2	8.15	17	950	29.86	4.14	2.92	62.18	0.9	0.52

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα πειράματος (Πηγή: Gikas, 2016)

4.1.2 Πειραματική εφαρμογή Ε.Μ.Π

Στη συγκεκριμένη πειραματική εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε στο Ε.Μ.Π. κατασκευάστηκε ένας αλλόθερμος εργαστηριακός αντιδραστήρας διαλείποντος έργου ως προς το στερεό με συνεχή τροφοδοσία υδρατμού σε περιβάλλον αζώτου. Παρόμοιες διατάξεις χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία (Domínguez et al., 2006) με στόχο την αρχική εξέταση μιας πιθανής πρώτης ύλης για την αεριοποίηση.

$$\Theta_c = \frac{\text{ποσότητα MLVSS στον αντιδραστήρα}}{\text{ποσότητα MLVSS που εξέρχονται σε 1 ημέρα}} = X \cdot V / Q \cdot X = V/Q = \Theta$$

- 1) Q = παροχή του υγρού αποβλήτου (m^3/d)
- 2) MLVSS = συγκέντρωση αιωρούμενων οργανικών στερεών (kg/m^3)
- 3) V = όγκος του βιοαντιδραστήρα (m^3)
- 4) S_o = συγκέντρωση του BOD_5 στην είσοδο (kg/m^3)
- 5) S_e = συγκέντρωση του BOD_5 στην έξοδο και εντός, του αντιδραστήρα πλήρους ανάμιξης (kg/m^3).
- 6) X : συγκέντρωση οργανικών αιωρούμενων στερεών – MLVSS (mg/L)
- 7) θ : υδραυλικός χρόνος παραμονής (d)

Γενική εικόνα διάταξης αεριοποίησης

Η μονάδα αεριοποίησης απαρτιζόταν από τρία τμήματα, τη γραμμή εισόδου του φέροντος αερίου και του υδρατμού, τον αντιδραστήρα και την γραμμή εξόδου του αερίου προϊόντος (Εικόνα 4.1.2).



Εικόνα 4.1.2 Διάταξης αεριοποίησης (Πηγή: Dominguez et al.,2006)

Αλλόθερμος εργαστηριακός αντιδραστήρας

Ο αντιδραστήρας, που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε (Εικόνα 4.1.3), είχε κυλινδρική διατομή με εσωτερική διάμετρο 8cm και ύψος 10cm. Το υλικό κατασκευής του ήταν ανοξείδωτο ατσάλι ειδικού τύπου, ώστε να είναι κατάλληλος για τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για της αντιδιαβρωτικές ικανότητες, σε οξειδωτικά αέρια (H_2S , H_2). Ο αντιδραστήρας τοποθετούταν σε φούρνο μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας $1,200^{\circ}C$.



Εικόνα 4.1.3 Πειραματικός αντιδραστήρας (Πηγή: Inguanzo et al., 2002)

Αέριο προϊόν

Το αέριο προϊόν διερχόταν διαδοχικά από το φίλτρο συγκράτησης βαρέων πισσών και της ιπτάμενης τέφρας, την συστοιχία των πλυντρίδων, τον μετρητή αερίου, τη γραμμή συλλογής δείγματος και τέλος οδηγούταν στον απαγωγό. Η διάταξη αυτή εξασφάλιζε τον καθαρισμό του αερίου την ταυτόχρονη παρακράτηση του πισσούχου παραπροϊόντος και την μέτρηση της παροχής και σύστασης του αερίου.

Τελική διαδικασία

Το σύνολο του πισσούχου παραπροϊόντος συλλεγόταν στις πλυντρίδες και μετρούταν σταθμικά (Oesch, et al. 1996, Hasler & Nussbaumer 2000). Το μη συμπυκνώσιμο αέριο προϊόν περνούσε από τον μετρητή αερίου (Wet Gas Meter –WGM της εταιρείας Ritter, μοντέλο TG-1), που ήταν συνδεδεμένος με το

καταγραφικό, και μέσω κατάλληλου λογισμικού μετρούταν και καταγραφόταν η στιγμιαία η συνολική παροχή του αερίου. Τέλος, τα δείγματα του αερίου συλλέγονταν και στη συνέχεια κάθε δείγμα οδηγούταν ξεχωριστά στον αέριο χρωματογράφο, όπου μετρούταν η σύσταση του σε H_2 , CO , CO_2 , CH_4 .

4.2 Πιλοτικές εφαρμογές

Στην βιβλιογραφία, αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις πιλοτικών εφαρμογών αεριοποίησης ιλύος, από Ε.Ε.Λ. Στις πιλοτικές εφαρμογές αναφέρονται παραδείγματα που αφορούν: Τους κύριους τύπους αεριοποιητών που έχουν χρησιμοποιηθεί, το παραχθέν αέριο της διεργασίας για κάθε τύπο αεριοποιητή ξεχωριστά και την τοποθεσία υλοποίησης της κάθε εφαρμογής.

▪ Αεριοποιητές περιστρεφόμενων τυμπάνων (Rotary drum)

Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης, μετρήθηκε και αποτελούταν από πίσσες 5.5 έως 8.5% (ξηρής βάσης), N_2 κάτω από (3%), 62.4% H_2 , 30% CO , 2.4% CH_4 3.4% CO_2 και ένα ποσοστό της τάξης του 1.8% άγνωστων αερίων. Το αέριο σύνθεσης ήταν υψηλής ποιότητας, καθώς και πλούσιο σε H_2 και CO , ενώ το συνολικό ποσοστό των αγνώστων και αδρανή αερίων ήταν κάτω από 3% σε όλες τις περιπτώσεις. Η πιλοτική εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος (Gikas,2016).

▪ Αεριοποιητές σταθερής κλίνης ανοδικής ροής (updraft)

Το παραχθέν αέριο προϊόν είχε θερμογόνο δύναμη περίπου $3-4 MJ/Nm^3$, με συγκέντρωση σε πίσσες $7 - 8 g/Nm^3$, και μέση σύσταση (%) 8-11 H_2 , 6-13 CO , 1.4 – 2 CH_4 , 11-15 CO_2 και 62.7 N_2 . Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στο τμήμα: Mechanical Engineering Department, Ίδρυμα University of Nigde, Turkey (Midilli et al., 2001 & Dogru et al., 2002).

- **Αεριοποιητές σταθερής κλίνης καθοδικής ροής (downdraft)**

Το παραχθέν αέριο προϊόν είχε θερμογόνο δύναμη περίπου 3-4MJ/Nm³, με το 30% του άνθρακα της ιλύος να καταλήγει σε πίσσες, και μέση σύσταση (%) 4 H₂, 15 CO, 1.5 CH₄, 15 CO₂ και 59 N₂. Η εφαρμογή έχει πραγματοποιηθεί σε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη έγινε στο τμήμα: Chemical Engineering, Industrial Chemistry and Material Science, University of Pisa, Italy (Seggiani et al., 2012), και η δεύτερη : University of Antioquia, Medellín, Colombia (Pérez et al., 2012).

- **Ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized Bed - FB).**

Το παραχθέν αέριο προϊόν είχε θερμογόνο δύναμη περίπου 4.8MJ/Nm³, μέση σύσταση (%) 11-13 H₂, 14-24 CO, 2-4 CH₄, 9-13 CO₂ και 46 N₂. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Η πρώτη στο τμήμα: Chemical and Environmental Engineering Departmen, Seville, Spain (Nilsson et al., 2012), και η δεύτερη: Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale and Department of Chemical Physics University of Science and Technology of China (Wang & Yan, 2009).

- **Αεριοποιητές σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας (CFB)**

Το παραχθέν αέριο προϊόν, είχε θερμογόνο δύναμη περίπου 11-14 MJ/Nm³, και μέση σύσταση (%) 39 H₂, 16 CO, 8 CH₄, 25 CO₂. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε δύο περιπτώσεις: Η πρώτη στην σχολή: Technical University Hamburg-Harburg Germany (Petersen & Werther, 2005) και η δεύτερη: Vienna university of Technology (Schmid et al., 2012).

4.3 Βιομηχανικές εφαρμογές

Αρκετές μελέτες πειραματικές και πιλοτικές μονάδες επίδειξης έχουν ολοκληρωθεί, αλλά ελάχιστες βιομηχανικές εφαρμογές έχουν τεθεί σε λειτουργία. Παρά την αφθονία της έρευνας, πολύ λίγες εταιρείες έχουν αποδώσει στοιχεία, τα οποία να είναι απαραίτητα για μια πλήρη αξιολόγηση. Σαν απαραίτητα δεδομένα θεωρούνται τα δεδομένα από μια πιλοτική ή εμπορική διαδικασία, όπου η ιλύς χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη. Κάποιες από τις εταιρίες, οι οποίες έχουν πραγματοποιήσει την αεριοποίηση της ιλύος σε βιομηχανικές εφαρμογές, είναι οι εξής (<http://terutalk.com/2012>):

Company	Technology
Pinnacle Biotech	No info available
PRM Energy	Fixed-bed Gasification
Pyromex AG	Rotary drum
Kopf	Fluidized bed
Bureau of Sewerage, Tokyo	Fluidized bed

Πίνακας 4.3 Βιομηχανικές εφαρμογές (Πηγή: <http://terutalk.com/2012>)

Η ιλύς από τις Ε.Ε.Λ επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με άνθρακα (λιγνίτη) ή σε κάμινους παραγωγής τσιμέντου, υποκαθιστώντας τον ορυκτό άνθρακα. Για την χρήση της ιλύος ως καύσιμο δεν είναι απαραίτητη η σταθεροποίησή της, αφού η μη σταθεροποιημένη ιλύς έχει μεγαλύτερη θερμική αξία (Αγγελάκης κ.α., 2005).

Ωστόσο είναι εξαιρετικά αμφίβολο εάν η μη σταθεροποιημένη ιλύς θα είναι αποδεκτή από την βιομηχανία, αφού δεν μπορεί να αποκλειστεί το ενδεχόμενο μόλυνσης κατά τον χειρισμό της ιλύος. (Αγγελάκης κ.α. 2005) .

Κατά τη χρήση της ιλύος στη τσιμεντοβιομηχανία, τυχόν στερεά υπολείμματα ενσωματώνονται στο τσιμέντο και δεν αφήνουν τοξικά κατάλοιπα. Οι υψηλές θερμοκρασίες και το οξειδωτικό περιβάλλον, εξασφαλίζουν την πλήρη καταστροφή των οργανικών ενώσεων της ιλύος, ενώ τα βαρέα μέταλλα της τέφρας αφού οξειδωθούν, γίνονται αδιάλυτα συστατικά του τσιμέντου. Επιπλέον, εξοικονομούνται πρωτογενή καύσιμα. Για την χρήση της ιλύος στη βιομηχανία θα πρέπει να ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια που ορίζει η Οδηγία 2000/76/EC για την συν-αποτέφρωση (αέρια ρύπανση, στάχτες, υγρά απόβλητα κλπ) (Αγγελάκης, κ.α.2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η τεchnοοικονομική ανάλυση βασίζεται σε τρεις επιλεγμένες μελέτες, που αφορούν αμιγώς εγκαταστάσεις αεριοποίησης αστικής ιλύος. Η πρώτη μελέτη αφορά αεριοποιητή περιστρεφόμενου τυμπάνου υπερυψηλής θερμοκρασίας (Ultra High Temperature Gasification). Η δεύτερη μελέτη αφορά αεριοποιητή που λειτουργεί με τεχνολογία σταδιακής αναμόρφωσης (Stage Reforming) με χρήση κεραμικών σφαιριδίων. Και οι δύο προαναφερόμενες μελέτες είναι χαρακτηρισμένες ως εμπιστευτικού τύπου (Confidential), γι' αυτό δεν επισυνάπτονται στην παρούσα εργασία. Η Τρίτη μελέτη αφορά ένα σύστημα αεριοποίησης δύο σταδίων (two-stage gasification system) αποτελούμενο από ένα αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδας (bubbling fluidized-bed), και ένα αεριοποιητή περιστρεφόμενου τυμπάνου υπερυψηλής θερμοκρασίας (Ultra High Temperature Gasification). Πρόκειται για μια τεχνική αξιολόγηση της EPA (U.S. Environmental Protection Agency) για την επεξεργασία ιλύος.

5.1 Τεchnοοικονομική ανάλυση με βάση την αεριοποίησης υπερυψηλής θερμοκρασίας με αεριοποιητή περιστρεφόμενου τυμπάνου

Η μελέτη εκπονήθηκε από Γερμανική εταιρία που έχει στην κατοχή της πατέντα για αεριοποιητή περιστρεφόμενου τυμπάνου, υπερυψηλής θερμοκρασίας.

Περιγραφή της τεχνολογίας

Το σύστημα της ολοκληρωμένης μονάδος απομάκρυνσης στερών, από ανεπεξέργαστα υγρά αστικά απόβλητα τα οποία στην συνέχεια αεριοποιούνται, αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα: (i) Ανάκτηση αιωρούμενων στερεών από την είσοδο της ΕΕΛ, με την χρήση μικροεσχαρών, με ποσοστό υγρασίας περίπου 55%. (ii) Ξήρανση των στερεών, ώστε το ποσοστό υγρασίας να κατέλθει στο 20-25% και προσωρινή αποθήκευση. (iii) Μεταφορά στερεών από τους αποθηκευτικούς χώρους και στη συνέχεια, σε χώρο ελεγχόμενης ατμόσφαιρας αζώτου (iv) Θερμική μετατροπή, με την μέθοδο της αεριοποίησης για παραγωγή αερίου σύνθεσης. Οι εμπορικά διαθέσιμοι τύποι αεριοποιητών που

διαθέτει η εταιρία έχουν δυναμικότητα 5 και 25ton/d (Εικόνα 5.1). Αυτού του τύπου οι αεριοποιητές, λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 800-1,200°C. (v) Καθαρισμός, αφύγρανση και προσωρινή αποθήκευση του αερίου σύνθεσης (syngas). Η διεργασία αυτή έχει σαν σκοπό την απομάκρυνση υγρασίας από το καθαρό (syngas), την συμπίεση του σε κανόνες πίεσης λειτουργίας του κινητήρα, και την ανάλυση του από ειδικούς αναλυτές δειγματοληπτικού ελέγχου. (vi) Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από ηλεκτροκινητήρες εσωτερικής καύσης.(vii) Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της μονάδος, και για διανομή της περίσσειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 5.1 Ολοκληρωμένη εγκατάσταση αεριοποίησης δυναμικότητας 25 ton/day (Πηγή: Gikas, 2016)

Σκεπτικό σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός αφορά μια Ελληνική ΕΕΛ, που λειτουργεί με την μέθοδο ενεργού ιλύος - παρατεταμένου αερισμού (χωρίς πρωτοβάθμια καθίζηση), με μέση ημερήσια παροχή $12.000 \text{ m}^3/\text{day}$. Η ΕΕΛ, εκτός από αστικά λύματα δέχεται και λύματα από βιομηχανίες τροφίμων (κυρίως χυμοποιεία), τα οποία έχουν αυξημένες παροχές κατά την περίοδο Νοεμβρίου - Μαρτίου, όπου παρατηρούνται αυξημένες φορτίσεις τόσο σε υδραυλική παροχή, όσο και σε ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), και βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD). Χαρακτηριστικά αναφέρεται, ότι κατά την περίοδο υψηλής φόρτισης η συγκεντρώσεις του BOD από την τυπική τιμή των 320 mg/l (παρατηρείται μεταξύ Απριλίου-Οκτωβρίου), λαμβάνουν τιμές περί τα $1,200 \text{ mg/l}$. Ως συνέπεια, κατά τους χειμερινούς μήνες η εγκατάσταση δέχεται μία σημαντικά αυξημένη παροχή στερεών, η οποία δεν δύναται να διαχειριστεί στην δεξαμενή αερισμού και περνά στον δευτεροβάθμιο διαυγαστή, με επακόλουθη χειροτέρευση της ποιότητας εκροής.

Με βάση αυτήν την μοναδική εποχιακή κατάσταση στην φόρτιση, η εταιρία πρότεινε την χρήση μικροεσχάρων (Εικόνα 5.1.1) ανάντη της δεξαμενής αερισμού, για την έγκαιρη απομάκρυνση και συλλογή τους. Σύμφωνα με εκτιμήσεις προσδιορίστηκε η παραγωγή βιοστερεών στην μικροεσχάρα κατά τους χειμερινούς μήνες μεταξύ 4 και 10.3 τόνοι βιοστερεών σε ξηρή βάση ανά ημέρα, ενώ κατά τους λοιπούς μήνες η παραγωγή εκτιμήθηκε μεταξύ 1.8 και 2.8 τόνοι βιοστερεών σε ξηρή βάση, ανά ημέρα.

Χαρακτηριστικά του σχεδιασμού

Ένα από τα πρώτα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού, είναι η ξήρανση των βιοστερεών (Εικόνα 5.1.1), η οποία επιτυγχάνεται ως εξής: Τα βιοστερεά από την μικροεσχάρα αναμιγνύονται με τα αφυδατωμένα βιοστερεά της δευτεροβάθμιας καθίζησης σε ειδικό θάλαμο ανάμειξης. Τα αναμειγμένα βιοστερεά, τοποθετούνται σε έναν προθερμαντήρα, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία τους μέχρι την θερμοκρασία των 88°C . Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε ένα σύστημα ξήρανσης, για το επιθυμητό ποσοστό ξήρανσης των βιοστερεών επί τοις εκατό σε ένα επίπεδο, το οποίο θα ποικίλει ανάλογα με το ακριβές μείγμα των υλικών,

αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις επιτυγχάνεται περίπου σε ποσοστό της τάξης του 77%. Το σύστημα ξήρανσης, χρησιμοποιεί θερμικό έλαιο, το οποίο θερμαίνεται μέσω μιας σειράς εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι είναι θερμαίνονται από την θερμότητα που παράγει το σύστημα συμπαραγωγής του ηλεκτροκινητήρα. Η θερμοκρασία του λαδιού κυμαίνεται από 205 ° C έως 215 ° C .Τέλος, η έμμεση θερμότητα μεταδίδεται στα βιοστερεά, και ο αέρας γεμάτος υγρασία, αναρροφάται από διάφορα μέσα, όπως (ανεμιστήρες, κυκλώνες κλπ), όπου στη συνέχεια φιλτράρεται και επανακυκλοφορείτε στο σύστημα.



Εικόνα 5.1.1 Σύστημα ξήρανσης βιοστερεών (Πηγή: <http://therma-flite.com>.)

Ο αεριοποιητής, θα βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία για περίπου 10 μήνες το χρόνο. Ωστόσο, η εποχιακή ανισορροπία παραγωγής υλός απαιτεί την προσωρινή αποθήκευση μέρους της. Για αυτό τον λόγο έγιναν κάποιοι αρχικοί υπολογισμοί, για την μηνιαία ροή του υλικού στον χώρο της αποθήκης και προς τον αεριοποιητή.



Εικόνα 5.1.2 Αεριοποιητής περιστρεφόμενου τυμπάνου υπερυψηλής θερμοκρασίας (5 ton/day) (Πηγή: Gikas, 2016)

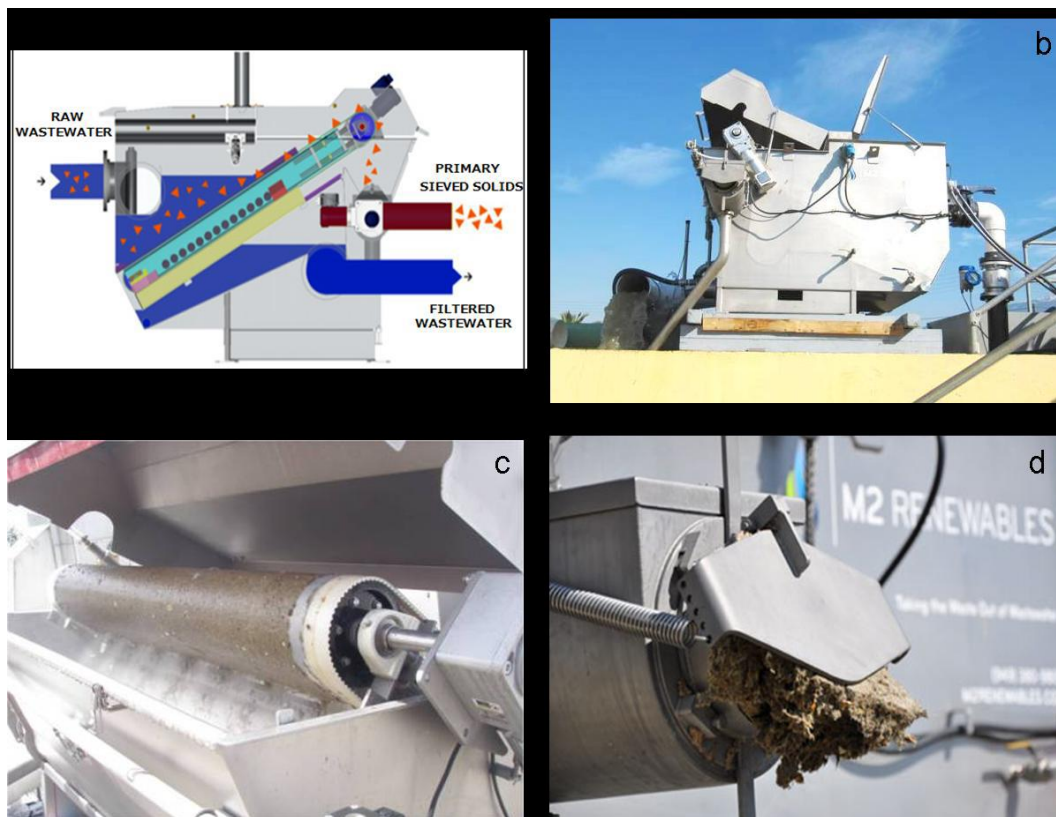
Τα πλεονεκτήματα της χρήση μικροεσχάρωσης ακολουθούμενης από αεριοποίηση υπερυψηλής θερμοκρασίας

Το σύστημα μικροεσχάρων, έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

1) Μειώνει σημαντικά, τον όγκο των στερεών της ιλύος. Αυτό επιτυγχάνεται από την λειτουργία, ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου στο εσωτερικό μέρος του συστήματος, ο οποίος περιστρέφει μία υφασμάτινη ταινία με διάκενα ύφανσης μεταξύ 10-250 nm. Κατά την διάρκεια της περιστροφικής λειτουργίας του κυλίνδρου, και της ταινίας, τα στερεά της ιλύος προσκολλούνται πάνω στον ιμάντα και στη συνέχεια απομακρύνονται, με χρήση ειδικού ξέστρου αέρα.

2) Συμβάλλει στην παραγωγή ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, και εξαλείφει τα θέματα που σχετίζονται με την διάθεση των βιοστερεών.

3) Η τέφρα που παράγεται από το σύστημα μετά την αεριοποίηση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητάς του σε οργανικά συστατικά.



Εικόνα 5.1.3 Σχηματικό διάγραμμα MicroScreen (Πηγή: Gikas, 2016)

Άλλα πλεονεκτήματα του συστήματος:

- Μηδενικές τοπικές εκπομπές αερίων, κατά την παραγωγή του αερίου σύνθεσης (κλειστό σύστημα αεριοποίησης).
- Σε υψηλές θερμοκρασίες αντίδρασης, πλήρης αναμόρφωση του συνόλου του άνθρακα που είναι δεσμευμένο στην μοριακή δομή του καυσίμου, του υδρογόνου, και του οξυγόνου, σε ένα υψηλής ποιότητας συνθετικό αέριο που αποτελείται κυρίως από CO και H₂.
- Δεν απαιτείται σύστημα παραγωγής οξυγόνου, για έγχυση στον αεριοποιητή.
- Δεν παράγεται πίσσα, πυρολυτικά έλαια, διοξίνες, φουράνια, ή βιοεξανθρακώματα.
- Στοιχειακή τέφρα, με <0,5% άνθρακα, κατάλληλη ως δομικό υλικό.

- Συν-επεξεργασία των διαφόρων στερεών αποβλήτων, πιθανά συμπεριλαμβανομένων των βιο-στερεών, τεμαχισμένων ελαστικών, καυσίμων προερχόμενων από απορρίμματα, βιομηχανικών αποβλήτων, γεωργικών αποβλήτων, πλαστικών κλπ.
- Πολύ απλές εργασίες χαμηλής ταχύτητας, με λίγα κινούμενα μέρη.
- Το συνθετικό φυσικό αέριο χημικής βαθμίδας, παρέχει μια πλατφόρμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, βιομεθανίου, υψηλής καθαρότητας υδρογόνου, υγρών καυσίμων ,και άλλων βιομηχανικών χημικών ουσιών.

Προϋπολογιστικές δαπάνες

Κόστος κεφαλαίου

Τα αναλυτικά στοιχεία, του συγκεκριμένου συστήματος παρουσιάζονται παρακάτω:

Στοιχείο	Σχόλια	Κόστος
Μεταφορά υλικού πρώτων υλών	Μεταφορικές ταινίες, κοχλίες, κάδος μεταφοράς	Περιλαμβάνεται
Θραύστης (μόνο για τα πρωτοβάθμια στερεά)	Για τα πρωτοβάθμια στερεά ή/και τα βιοστερεά	Περιλαμβάνεται
Αναμεικτήρας/τροφοδότης	Αναμειγνύει τα φρέσκα στερεά, τα βιοστερεά και τα συμπληρωματικά στερεά από την αποθήκευση	Περιλαμβάνεται
Έμμεσα θερμαινόμενος ξηραντήρας στερεών	Ρυθμός ικανότητας εξάτμισης: 818 kg H ₂ O/ώρα	Περιλαμβάνεται
Φίλτρα επεξεργασίας νερού	Για τον συμπυκνωτή ατμού ξηραντήρα	Περιλαμβάνεται
Μονάδες ελέγχου οσμών	Για τις μη-συμπυκνώσιμες πτητικές οργανικές ενώσεις από τον ξηραντήρα	Περιλαμβάνεται
Καθαρισμός w/N ₂ ξηρών στερεών αποθήκευσης 3 ημερών		Περιλαμβάνεται
Γεννήτρια αερίου αζώτου	Αποθήκευση στερεών και αντιδραστήρα UHT	Περιλαμβάνεται
Μεταφορά ξηρών στερεών	Κάδος μεταφοράς/κοχλίες πολλαπλής τροφοδοσίας	Περιλαμβάνεται
Ένας αντιδραστήρας 5 TPD (σε ξηρή βάση) UHT	5 TPD με 1200° C	Περιλαμβάνεται
Αέριο απορρόπησης / Σύστημα κλιματισμού	Σταθεροί πύργοι απόσβεσης, οξύ και καυστικό, συγχωνευόμενο φίλτρο, ξηραντής προσροφητικού	Περιλαμβάνεται

	τύπου, ανεμιστήρας	
Ψύξη και αφαίρεση τέφρας		Περιλαμβάνεται
Δεξαμενή ρύθμισης πίεσης αερίου	Ρύθμιση της πίεσης στα 5 psi	Περιλαμβάνεται
Ηλεκτροκινητήρας	GE Jenbacher Type 3 (J312 GS @637 kW, 50 Hz)	Περιλαμβάνεται
Σύστημα SCR για τον έλεγχο NOx και CO (προαιρετικό)		(προαιρετικό)
Ένας εναλλάκτης θερμότητας στοίβας καυσαερίων κινητήρα	Εναλλάκτης θερμότητας θερμικού πετρελαίου στους 215 ° C	Περιλαμβάνεται
Ηλεκτρικός πίνακας, διακόπτης και προστατευτικός εξοπλισμός ηλεκτρονόμου	Σχεδιασμένα για συγχρονική παραγωγή	Περιλαμβάνεται
MCC και Πίνακας Κεντρικού Ελέγχου		Περιλαμβάνεται
Άλλα	Σωληνώσεις, βαλβίδες, σφραγίδες, κινητήρες, αντλίες, μόνωση, αισθητήρες, πλαίσια στήριξης, πασαρέλες, αγωγός, ηλεκτρικά καλώδια, σύρματα ελέγχου,	Περιλαμβάνεται
Χρώμα και φινίρισμα ανάλογα με τις προδιαγραφές		Περιλαμβάνεται
Αποστολή		Περιλαμβάνεται
Εκκίνηση λειτουργίας και κατάρτισης		Περιλαμβάνεται
Σύνολο προϋπολογισμού συστήματος 5 TPD		\$6,000.000

Πίνακας 5.1.1 Λίστα εξοπλισμού και συνολικό Κόστος

Τα λειτουργικά έξοδα, όσον αφορά τα οφέλη της ξήρανσης των βιοστερεών με αέρα, την συντήρηση, προσωπικό, έρευνα, ταξίδια, υπολογίζονται σε 615,800 €/year.

Η καθαρή ποσότητα συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος, που παράγεται από το σύστημα, για επί τόπου χρήση ή και εξαγωγή προς το περιφερειακό ηλεκτρικό δίκτυο, εκτιμάται στην απόδοση των 300 kWe. Αυτό όμως, εξαρτάται από την εποχή του έτους, και το εισερχόμενο φορτίο στερεών στην εγκατάσταση.

Μέγεθος	Τιμές
Εισερχόμενα βιοστερεά (ξηρή βάση)	5,0 ton/day
Μεικτή ηλεκτρική ισχύς	446 kW
Ηλεκτρική Ισχύς καταναλισκόμενη από το σύστημα	146 kW
Καθαρή ισχύς ηλεκτροπαραγωγής	300 kW

Πίνακας 5.1.2 Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

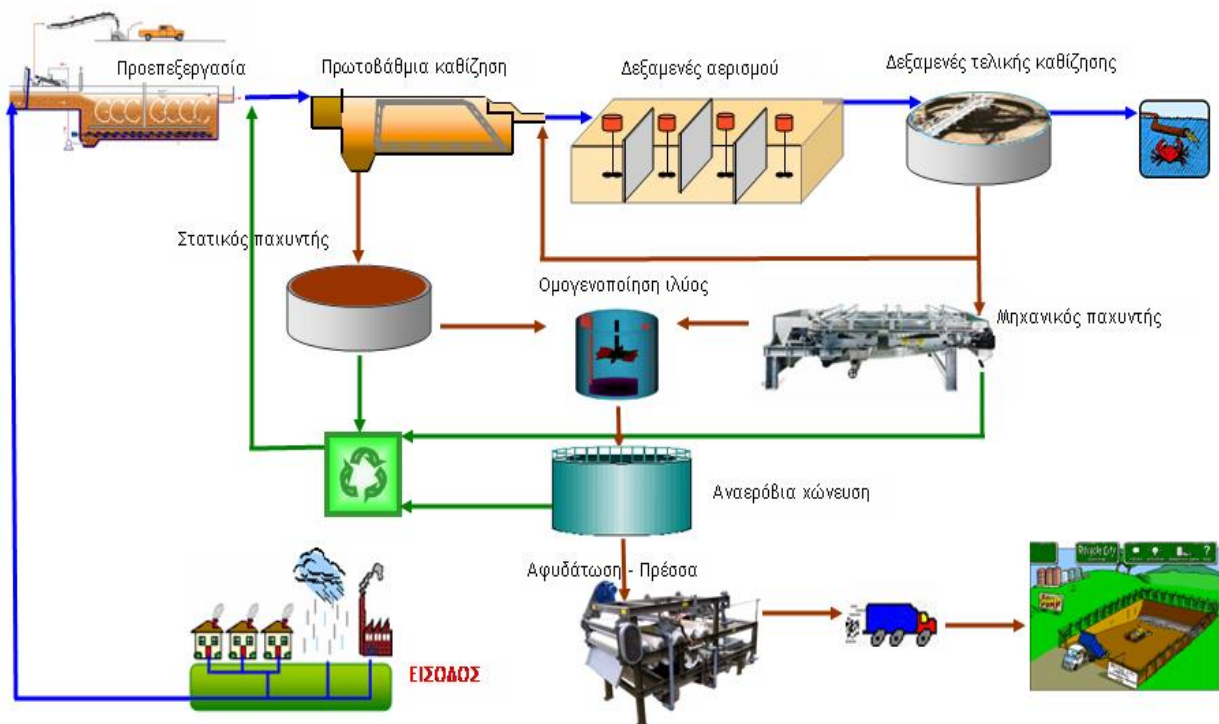
5.2 Τεχνοοικονομική ανάλυση με βάση την τεχνολογία σταδιακής αναμόρφωσης με χρήση κεραμικών σφαιριδίων

Σκεπτικό σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός, αφορά μια Ελληνική ΕΕΛ (Σχήμα 5.2), η οποία περιλαμβάνει, κοινή συλλογή βιομηχανικών, και αστικών αποβλήτων, με μέση ημερήσια παροχή 32.000 m³/day. Ο αποδέκτης των επεξεργασμένων λυμάτων, έχει χαρακτηριστεί ως ευαίσθητος και επιβάλλεται η απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου, όπως επιπλέον και η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στην ΕΕΛ, είναι: Προεπεξεργασία με εσχάρωση, εξάμμωση, και απολίπανση. Φυσικο-χημική επεξεργασία με επίπλευση, χημικά υποβοηθούμενη πρωτοβάθμια επεξεργασία, χημική απομάκρυνση φωσφόρου, και τέλος βιολογική επεξεργασία για την απομάκρυνση οργανικού άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου. Στην συνέχεια τα επεξεργασμένα λύματα, οδηγούνται με βαρύτητα σε αντλιοστάσιο τελικής διάθεσης, και μέσω ενός αγωγού διατίθεται εντός του θαλάσσιου αποδέκτη σε βάθος -54 m.

Η περίσσεια βιολογική ιλύς, καθώς και η πρωτοβάθμια ιλύς των αστικών και βιομηχανικών λυμάτων, υπόκεινται σε αναερόβια χώνευση. Στην συνέχεια, η χωνευμένη ιλύς οδηγείται στην μονάδα αφυδάτωσης, που αποτελείται από 2 ταινιοφιλτρώπρεςσες, δυναμικότητας 10 m³/h η κάθε μία.

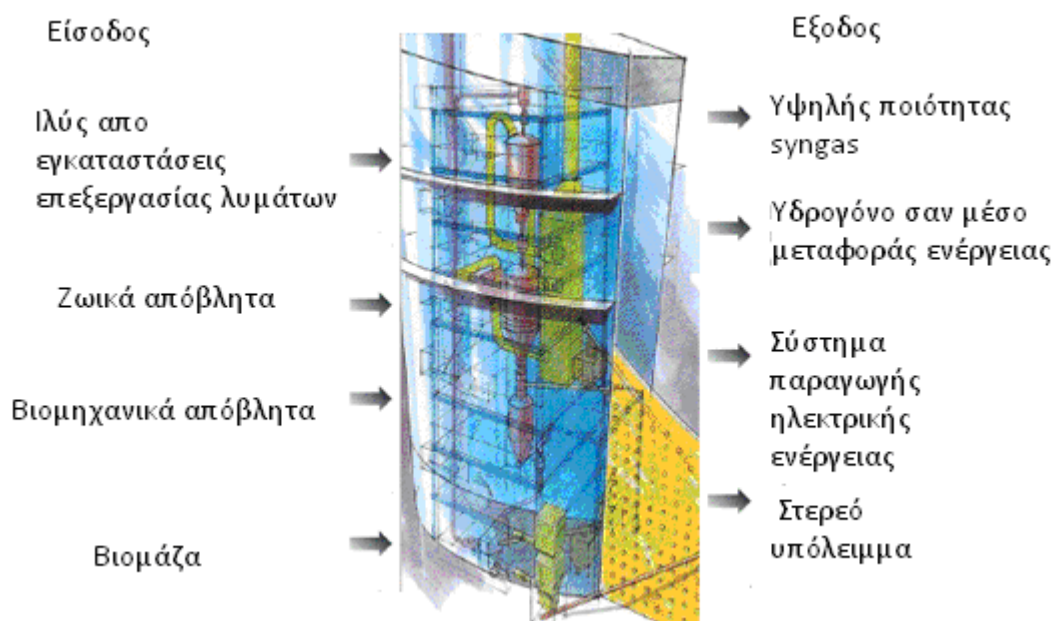
Η άμμος που απομακρύνεται από τα λύματα κατά την προεπεξεργασία, καταλήγει τελικά σε κοντέινερ συλλογής, αφού αφυδατωθεί με την βοήθεια ενός κοχλιοδιαχωριστή, ενώ τα στραγγίδια επιστρέφουν σε μια από τις δύο δεξαμενές εξάμμωσης.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ

Χαρακτηριστικά σχεδιασμού

Η μελέτη αυτή, πραγματοποιήθηκε από μια γερμανική εταιρία, η οποία κατασκευάζει αεριοποιητές για την παράγωγή αερίου σύνθεσης από: 1) Βιομάζα, 2) Βιομηχανικά και αστικά απορρίμματα, 3) Ιλύος από ΕΕΛ(Σχήμα 5.2.1). Στη συνέχεια αξιοποιεί το αέριο σύνθεσης, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

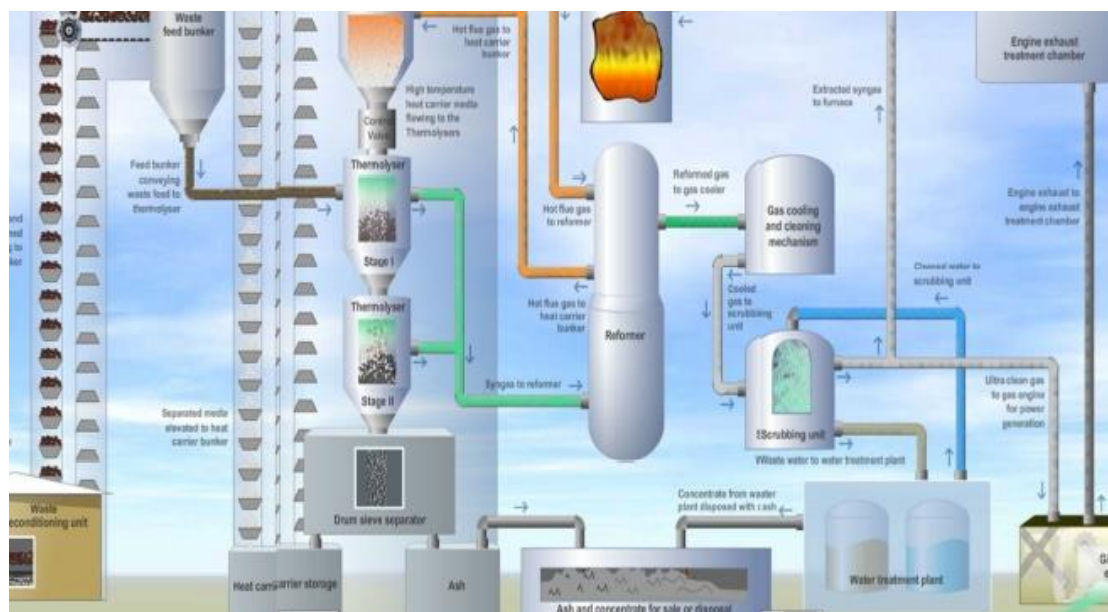


Σχήμα 5.2.1 Διάγραμμα ροής

Η τεχνολογία αεριοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη, είναι τύπου (Stage Reforming), και λαμβάνει χώρα στην θερμοκρασία των $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το ποσοστό υγρασίας των βιοστερεών, πριν από την διεργασία της ξήρανσης είναι 80%, και το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας στην είσοδο του αεριοποιητή μετά την διεργασία της ξήρανσης, εκτιμάτε περίπου στο 15%.

Τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού, όσον αφορά την ξήρανση των βιοστερεών, έχουν ως εξής: Για την μη χρησιμοποίηση φυσικού αερίου, η οποιασδήποτε διαφορετικής μορφής ενέργειας, χρησιμοποιείται ένας έμμεσος ξηραντήρας. Ο ξηραντήρας, χρησιμοποιεί τα θερμά απαέρια που παράγονται από το σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση εναλλακτών. Ο θερμικός εναλλάκτης περιέχει θερμικό λάδι, και επανακυκλοφορεί την θερμότητα στο σύστημα, για την επίτευξη της συνεχούς ξήρανσης των βιοστερεών.

Η θερμιδική αξία που προκύπτει κατά την έξοδο από τον ξηραντήρα, είναι 14,04 GJ/t. Στο σχήμα (5.2.1), βλέπουμε ένα διάγραμμα διεργασιών για την ενεργειακή αξιοποίηση των βιοστερεών. Η συνολική έκταση της μονάδος, δεν θα ξεπερνάει τα 1500 m^2 και το φορτίο των 250 τόνων ιλύος/ημέρα.



Σχήμα 5.2.1 Διάγραμμα διεργασιών

Πλεονεκτήματα του σχεδιασμού

Κάποια από τα πλεονεκτήματα σχεδιασμού της μονάδας είναι τα εξής:

- Χρησιμοποιεί, οποιοδήποτε είδος οργανικής ύλης.
- Παραγωγή υψηλής ποιότητας (Syngas), πλούσιο σε H_2 .
- Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια 925,7 kWh / ton βιοστερεών (ξηρή βάση).
- Χαμηλό κόστος παραγωγής - λειτουργίας,, περίπου 0,04 € ανά kWh καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η διαδικασία, δεν απελευθερώνει βαρέα μέταλλα.
- Πληρεί τις προϋποθέσεις για λειτουργία, σε κατοικημένες περιοχές (ανάλογα με την είσοδο του φορτίου, και τους τοπικούς κανονισμούς).
- Χαμηλές απαιτήσεις χώρου, χωρίς οσμές και χαμηλά επίπεδα θορύβου.
- Πληρεί, όλες τις προδιαγραφές των κανόνων ης νομοθεσίας που ορίζει η Ε.Ε.

Προϋπολογιστικές δαπάνες

Κόστος κεφαλαίου

Η ολοκληρωμένη μονάδα, για την ενεργειακή αξιοποίηση των βιοστερεών, αποτελείται από:

- Αποθηκευτικούς χώρους, σύστημα εισαγωγής.
- Καθαρισμός (Syngas).
- Πύργος ψύξης.
- Ατμοστρόβιλος, ηλεκτρογεννήτρια, Boiler.
- Ηλεκτροκινητήρα εσωτερικής καύσης και γεννήτρια.
- Επεξεργασία Νερού.
- Προμήθεια Αέρα .
- Περιφερειακός Εξοπλισμός.
- Σύστημα εισαγωγής προπανίου και αζώτου.
- Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος έκτακτης ανάγκης.

Το κόστος της μονάδας, ανέρχεται στα 2,900.000 €, ενώ η εταιρία ζητά επιπλέον 15,000 €/έτος, για την άδεια χρήσης της τεχνολογίας.

Τα λειτουργικά έξοδα, όσον αφορά την συντήρηση, προσωπικό, έρευνα, κλπ, υπολογίζονται στα 96,000 €/ year. Η καθαρή ισχύς ηλεκτρικού ρεύματος, που παράγεται από το σύστημα μονάδος σχεδιασμού της εταιρίας εκτιμάται στα 540 kWe.

Μέγεθος	Τιμές
Εισερχόμενα βιοστερεά (ξηρή βάση)	14 ton / day
Μεικτή ηλεκτρική ισχύς	600 kW
Ηλεκτρική Ισχύς καταναλισκόμενη από το σύστημα	60 kW
Καθαρή ισχύς ηλεκτροπαραγωγής	540 kW

Πίνακας 5.2.1 Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

5.3 EPA (U.S. Environmental Protection Agency)

Σκεπτικό σχεδιασμού

Η παρούσα μελέτη, είναι της Αμερικάνικης Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος (<http://terutalk.com/2012>), και αναφέρεται σε αεριοποίηση ιλύος από μια τυπική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, επιλογής της. Η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων διαχειρίζεται 3,800 m³ /day, και παράγει από 0,36 t έως 1,36 t ξηρής ιλύος/day. Μετά από την προαπαιτούμενη επεξεργασία, η ιλύς περιέχει ποσοστό σε υγρασία από 79 έως 99% κατά βάρος, ενώ το υπόλοιπο μέρος είναι στερεό, αποτελούμενο κυρίως από οργανική ύλη άλατα, και μικροοργανισμούς.

Χαρακτηριστικά σχεδιασμού

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, που αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την μέθοδο της αεριοποίησης βιοστερεών, και ένα παράδειγμα, μιας βασικής οικονομικής ανάλυσης, η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε αποτελούταν από: α) Ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας της ιλύος των λυμάτων. β) Έναν έμμεσο (indirect) ξηραντήρα της εταιρίας therma flite. γ) Ένα σύστημα αεριοποίησης δύο σταδίων (two-stage gasification system), αποτελούμενο από, ένα αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδας, και ένα αεριοποιητή περιστρεφόμενου τυμπάνου υπερυψηλής θερμοκρασίας. δ) Ένα σύστημα καθαρισμού του αερίου (syngas), και ε) Ένα ηλεκτροκινητήρα εσωτερικής καύσης, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

και θερμότητας. Το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας στην είσοδο των αεριοποιητών, μετά την διεργασία της ξήρανσης είναι: α) 10% για τον αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης φουσαλίδας, και β) 22% για τον αεριοποιητή περιστρεφόμενου τυμπάνου υπερυψηλής θερμοκρασίας(<http://terutalk.com/2012>).

Προϋπολογιστικές δαπάνες

Κόστος κεφαλαίου

Οι προϋπολογιστικές δαπάνες και το κεφαλαιουχικό κόστος, υπολογίστηκαν με βάση το μέσο κόστος ενός συστήματος αεριοποίησης βιομάζας. Το κόστος και το κέρδος, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμήθηκαν από την εταιρία Sustainable and Responsible Investment SRI, η οποία εδρεύει στην **California, των Ηνωμένων πολιτειών**, σε συνεργασία με το Αμερικάνικο Υπουργείο Ενέργειας, σε σύγκριση και κάτω από ποικίλες συνθήκες λειτουργίας. Το κόστος του κεφαλαίου, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, και το ετήσιο κόστος λειτουργίας, παρουσιάζονται σε δολάρια ΗΠΑ ανά ξηρό τόνο ιλύος (DT) ανά ημέρα, ανάλογα με την ικανότητα επεξεργασίας. Τέσσερα διαφορετικά σενάρια αναλύθηκαν από την SRI, η οποία χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές ενέργειας, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, μπόρεσε να παραθέσει την εκτιμώμενη απόσβεση (<http://terutalk.com/2012>). Στη συνέχεια, αναλύονται και παραθέτονται τα αποτελέσματα των διαφορετικών σεναρίων):

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΕΝΑΡΙΑ			
	ΕΘΝΙΚΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΧΟΝΔΡΙΚΗΣ ΠΩΛΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΝΕΑ ΑΓΓΛΙΑ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΧΟΝΔΡΙΚΗΣ ΠΩΛΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΣΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΡΕΥΜΑ -ΤΙΜΗ + \$ 0,0435 / kWh ΠΑΓΙΟ *	ΝΕΑ ΑΓΓΛΙΑ ΜΕΣΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΡΕΥΜΑ - ΤΙΜΗ + \$ 0.0435 / kWh ΠΑΓΙΟ *
Η τιμή του ηλ /ρεύμ (\$ / kWh)	\$0.0420	\$0.0495	\$0.0855	\$0.0930
Χρέωση (\$ / DT)	\$70.00	\$70.00	\$70.00	\$70.00
Ετήσια Λειτουργικά Έσοδα, Ηλεκτρική ενέργεια + Τέλη (\$)	\$41,624.00	\$44,583.00	\$58,783.00	\$61,742.00
Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας(\$)	\$36,995.00)	(\$37,665.00)	(\$40,881.00)	(\$41,551.00)
Κόστος κεφαλαίου (\$)	(\$269,815.00)	(\$269,815.00)	(\$269,815.00)	(\$269,815.00)
Επενδύσεις / kW (\$ / kW)	\$4,651.98	\$4,651.98	\$4,651.98	\$4,651.98
Χρόνια Απόσβεσης	21	21	11	7

Πίνακας 5.3 SRI (Πηγή : <http://terutalk.com/2012>)

Χρησιμοποιώντας τις άνωθεν τιμές, σε εθνικό μέσο όρο, και το μέσο κόστος χονδρικής της ηλεκτρικής ενέργειας στην Νέα Αγγλία, το κόστος κεφαλαίου για μία μονάδα απόδοσης συνολικής ισχύος 15 MW εκτιμάται σε \$60,000.000.

Επίσης, η διάρκεια αποπληρωμής της μονάδος εκτιμάται σε 21 και 7 χρόνια αντίστοιχα. Λόγω της έλλειψης πληροφοριών, σχετικά με το τεχνικό και σχεδιαστικό

πλάνο, δεν ήταν δυνατόν να γίνει ο ακριβής υπολογισμός του κόστους(<http://terutalk.com/2012>).

5.4 Σύνοψη

Μέσω των ξεχωριστών, ατομικών αναλύσεων πλήρης κλίμακας, διαπιστώθηκαν τεκμηριωμένες, και ρεαλιστικές προβλέψεις του κόστους, όπως επίσης, και οι δυνατότητες απόδοσης ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος. Σε γενικές γραμμές όμως, όσο πιο σύνθετες θα είναι οι τεχνολογίες, τόσο υψηλότερες θα είναι και οι προϋπολογιστικές δαπάνες. Επίσης, ένας από τους βασικότερους παράγοντες, ο οποίος θα επιτελέσει μία σημαντική επίδραση, όσον αφορά το οικονομικό σκέλος, και της υλοποίηση τέτοιων συστημάτων σε εμπορική κλίμακα, είναι οι τιμές χονδρικής της ηλεκτρικής ενέργειας που προαναφέρθηκαν στην μελέτη (5.3). Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά, τα στοιχεία που προκύπτουν από τις τρεις παραπάνω μελέτες:

	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΙΣΧΥΟΣ
	(kWe)	(kWh/ton)	(US \$ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ €)	(€/year)	(€/kWe)
ΜΕΛΕΤΗ (5.1)	300	1440	\$6,000.000 => 5,575.000€	615,800	18,583.33
ΜΕΛΕΤΗ (5.2)	540	925,7	2,900.000€	96,000	5,370.37
ΜΕΛΕΤΗ (5.3)	15,000	—	\$60,000.000=>55,75 1.000€	—	3,716.73

Πίνακας 5.4 Αναλυτικά στοιχεία μελετών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^Ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα και προτάσεις

- Το κόστος κεφαλαίου των μονάδων αεριοποίησης βιοστερεών, για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις δυνατοτήτων ηλεκτροπαραγωγής, αντιστοιχεί σε 5,575.000€, 2,900.000€ και 55,751.000€.
- Η ποσότητα των δεδομένων της έρευνας, που αφορά την ενεργειακή αξιοποίηση βιοστερεών, μας δίνει το προφανές συμπέρασμα, ότι υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον παγκοσμίως, για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας σε εμπορική κλίμακα.
- Αν και υπάρχουν πολλές επιλογές, όταν πρόκειται για νέες μεθόδους αξιοποίησης των βιοστερεών, η αεριοποίηση λαμβάνει σήμερα τη μεγαλύτερη προσοχή, διότι προσφέρει μια δυνητικά βιώσιμη επιλογή, σε σύγκριση με τις άλλες καινοτόμες τεχνολογίες, όπως η οξείδωση και η πυρόλυση, οι οποίες μελετώνται και εξελίσσονται σταδιακά.
- Η ενεργειακή αξιοποίηση βιοστερεών με την μέθοδο της αεριοποίησης, είναι σε θέση να παρέχει ένα καθαρό και διαχειρίσιμο αέριο προϊόν (syngas), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και την δυνατότητα καθαρών κερδών μέσω αυτής, και ίσως στο μέλλον να καθιστά τις ΕΕΛ ενεργειακά ανεξάρτητες.
- Η μεταβλητότητα της τεχνολογίας, και η έλλειψη πληροφοριών, σχετικά με τα συστήματα σε εμπορική κλίμακα, καθιστά δύσκολο να εξασφαλιστεί μια πλήρη εκτίμηση, όσον αφορά το ακριβές κόστος μιας ολοκληρωμένης μονάδας, και το μακροπρόθεσμο κέρδος από αυτή.
- Πρέπει να διεξάγεται μία συνεχής αξιολόγηση των αναδυόμενων τεχνολογιών, για να εξασφαλιστεί, ότι οι επιπτώσεις των τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών, τόσο θετικές όσο και αρνητικές, καθορίζονται πριν από την ευρεία εφαρμογή.
- Η δέουσα επιστημονική επιμέλεια, θα βοηθήσει ώστε να διασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή, και η κοινωνική αποδοχή των τεχνολογιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Ανδρεαδάκης, Α., Δ., Μαμάης, Γ., Ντινοπούλου & Α. Τζίμας, 2006, Ασβεστοποίηση Ιλύων Από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων, Διημερίδα: Μονάδες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων Μικρής Κλίμακας, Πορταριά, σελ. 393-401.

Αγγελάκης, Α., κ.α. (2005). Εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης των παραπροϊόντων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.

Αγγελάκης, Α. Ν., Τσαγκαράκης, Κ. Π, Κοτσελίδου, Ο. Ν. και Βαρδάκου, Ε. (2000). Ανάγκη Θέσπισης Ελληνικών Προδιαγραφών Ανάκτησης και Επαναχρησιμοποίησης Εκροών Επεξεργασμένων Αστικών Υγρών Αποβλήτων: Μια Προκαταρκτική Προσέγγιση. Τεχνική Έκθεση για το ΥΠΕΧΩΔΕ και την Ένωση Δημοτικών Επιχειρήσεων Ύδρευσης Αποχέτευσης ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα.

Γιδαράκος, Ε (2006). Επικίνδυνα Απόβλητα: Διαχείριση-Επεξεργασία-Διάθεση, Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη.

Μαρκαντωνάτος, Γ. (1990). Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων, αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα, ζωικά απορρίμματα», 2η Έκδοση, Αθήνα. σελ 467-473.

Τζουπάνος, Ν., & Σαμαρά, Κ., (2004). “Παραμένοντες Οργανικοί Ρύποι στην ατμόσφαιρα της Ευρώπης”. Χημικά Χρονικά, 11, σελ 25-30.

Τσώνης Π. Σ., (2004). Επεξεργασία Λυμάτων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα. ISBN: 960-7530 51-9.

Στάμου, Α. Ι. και Βογιατζής Ζ. Σ. (1994). Βασικές Αρχές και Σχεδιασμός Συστημάτων Επεξεργασίας Αποβλήτων, 2η Έκδοση ΤΕΕ,. Αθήνα .

Στάμου, Ι., Αναστάσιος (1995). Βιολογικός Καθαρισμός Αστικών Αποβλήτων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

Διεθνής

- Andreadakis A., D. Mamais, E. Gavalaki and S. Kampylafka (2002). Sludge utilisation agriculture: possibilities and prospects in Greece. National Technical University of Athens, 7th International Conference on Environmental Science and technology, Syros Island, Greece. Water Science and Technology, 46(10): 231-238.
- Bain R.L.(1992). Material and Energy Balances for Methanol from Biomass Using Biomass Gasifiers, NREL/TP-510-17098, January.
- Bridgwater A.V., Evans G.D, (1993). An Assessment of Thermochemical Conversion Systems for Processing Biomass and Refuse, Energy Technology Support Unit (ETSU) on behalf of the Department of Trade, ETSU B/T1/00207/REP.
- Ciferno J. P., Marano J.J, (2002).Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production, Prepared for U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory.
- Craig K.R., Mann M.K., Bain R.L, October (1996). Cost and Performance Analysis of Biomass-Based Integrated Gasification Combined-Cycle (BIGCC) Power Systems, National Renewable Energy Laboratory, Task No. BP611717.
- Degremont G, (2002). Water Treatment Handbook 6th Edition Vol 1&2 Lavoisier, Wiley.
- Debellefontaine H., Foussard, J.N, (1999). ‘Wet air oxidation for the treatment of industrial wastes. Chemical aspects, reactor design and industrial applications in Europe’ Waste Management 20(1):15-25.
- Dogru M, Midilli A, Howarth CR, (2002). ‘Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis’. Fuel Process Technology,75:55–82.

- Dominguez, A., J. A. Menendez, M. Inguanzo, and J. J. Pis. (2006). "Production of Bio-Fuels by High Temperature Pyrolysis of Sewage Sludge Using Conventional and Microwave Heating.". *Bioresour Technol* 97, no. 10: 1185-93.
- European Commission DG Environment, (2010). " Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Final Report. Part III: Project Interim Reports." Study Contract DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r.
- Fytili D., & Zabaniotou A., (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(1), 116-40.
- Gikas, P., Noll, S.A., Stedman, K., Tchobanoglous, G., (2010). The characterization and testing of wastewater fine screen fresh solids for suitability as a gasification feedstock. Proceedings of the 2nd International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management, 5-8 October, Chania, Greece.
- Gikas, P., Noll, S., Stedman, K., (2011). "Gasification of Primary Fine-Screened Solids for Energy Production," Eurasia Waste Management Symposium, Halic Congress Center, Istanbul, Turkey, November 14-16,
- Gikas P., (2013) Wastewater treatment plants as net energy production factories. International Conference on Environmental and Hazardous Substance Management towards a Green Economy, 2013 May 21–23; Bangkok, Thailand.
- Gikas, P., (2014). Electrical energy production from biosolids: A comparative study between anaerobic digestion and ultra-high-temperature gasification. *Environ. Technol.* 35(17), 2140-2146.
- Gikas, P., (2016). Ultra high temperature gasification of municipal wastewater primary biosolids in a rotary kiln reactor for the production of synthesis gas, *Journal of Environmental Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.043>.

D,L,Granatstein, (2003). Case study on Waste -Fuelled Gasification project GREVE IN CHIANTI ,ITALY.

Hamiltom CJ. (2000). ‘Gasification as an innovative method of sewage sludge disposal.’ Water and Environment Journal 14:89–93.

Hasler, P. & T. Nussbaumer (2000). "Sampling and analysis of particles and tars from biomass gasifiers." Biomass and Bioenergy 18: 61-66.

Hasatani Masanobu, Noriyuki Kobayashi, and Zhanyong Li (2001). “R&d in Japan drying technology”, Drying and Dewatering, 19(7), 1223–1251.

Inguanzo M, Domvnguez A, Menendez JA, Blanco CG, Pis JJ. (2002). "On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, Βιβλιογραφία 132 liquid and gas fractions." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 63:209–22.

Juniper Consultancy Services Limited, Independent Waste Technology Reports, Plasma, Its role in waste processing: A Decision Maker’s Guide, September 2006, Bathurst house, Bisley GL6 7NH, England.

Khan, Y., Anderson, G.K., Elliott, D.J. (1999). ‘Wet oxidation of activated sludge’ Water Research 33(7):1681-1687.

Kouloumbis, P. et al., (2000). Environmental Problems from the disposal of sewage sludge in Greece. Int. J. Environm. Health Research, 10, 77-83.

Kumabe K., Hanaoka T., Fujimoto S., Minowa T., Sakanishi K, (2007). Co-gasification of woody biomass and coal with air and steam, Fuel, 86, pp 684–689.

Lesch A. John, (2000). The German Chemical Industry in the Twentieth Century, Kluwer Academic Publishers, pp 147-158.

- Mountouris, A., Voutsas, E., Tassios, D. (2008). 'Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization' *Energy Conversion and Management* 49(8):2264-2271.
- Malkow, T, (2004). Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal, *Waste Management* 24 53-79.
- Mann M.K., Spath P.L, (1997). Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle Power System, TP-430-23076, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
- Metcalf & Eddy (1991). «Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse» International Edition, Mc Graw-Hill Inc. ISBN 0 07 0416907.
- Metcalf & Eddy, I, (2003).Wastewater Engineering, Treatment and Reuse, 4th ed, McGraw-Hill, New York, USA.
- Midilli, A. Dogru, M., Howarth, C.R., Ling, M.J., Ayhan, T. (2001). 'Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier' *Energy Conversion and Management* 42: 157-172.
- Mohai, I. & Szépvölgyi, J, (2005). Treatment of particulate metalurgical wastes in thermal plasmas, *Chemical Engineering and Processing* 44 225–229.
- Nema, S.K. & Ganeshprasad, K.S, (2002). Plasma pyrolysis of medical waste, *Current Science India* . 83 271-278.
- Nezu, A., Morishima, T. & Watanabe, T. (2003). Thermal plasma treatment of waste ionexchange resins doped with metals, *Thin Solid Films* 435 335–339.
- Nilsson, S., Gómez-Barea, A., Cano, D.F. (2012). 'Gasification reactivity of char from dried sewage sludge in a fluidized bed' *Fuel* 92(1): 346-353.

- Oesch, P., E. Lepptimtiki, et al. (1996). "Sampling and characterization of high-molecular-weight polyaromatic tar compounds formed in the pressurized fluidized-bed gasification of biomass " *Fuel* 72(12): 1406-1412.
- Patrick C.A. Bergman, Sander V.B. van Paasen, and Harold Boerrigter The novel "OLGA" technology for complete tar removal from biomass producer gas Energy research Centre of the Netherlands (ECN), Unit ECN Biomass, P.O. Box 1, 1755 ZG Petten, The Netherlands 30 September - 1 October 2002, Strasbourg, France.
- Pérez, J.F., Melgar, A., Benjumea, P.N, (2012). 'Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study' *Fuel* 96: 487-496.
- Perez-Elvira, S.I., Nieto Diez P., Fdz-Polanco F, (2006). "Sludge minimization technologies." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 5 : 375–398.
- Petersen, I. Werther, J. (2005). 'Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed' *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 44(7): 717-736
- McKendry Peter, Elsevier Accepted 6 July (2001). "Energy Production from Biomass (part 3): gasification technologies, Applied Environmental Research Center Ltd, Tey Grove, Elm Lane, Feering, Colchester Co5 9ES, UK.
- Schmid, J.C., Wolfesberger, U., Koppatz, S., Pfeifer, C., Hofbauer, H, (2012) 'Variation of feedstock in a dual fluidized bed steam gasifier-influence on product gas, tar content, and composition' *Environmental Progress & Sustainable Energy* 31(2): 205-215.
- Seggiani, M. Vitolo, S. Puccini, M. Bellini, A. (2012). 'Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier' *Fuel* 93: 486-491.

- Stammach MR, Kraaz B, Hagenbucher R, Richarz W (1989). "Pyrolysis of sewage sludge in a fluidised bed." *Energy and Fuels*, 3:255–9.
- Turovskiy, I.S. and Mathai, P.K., (2006). *Wastewater Sludge Processing*, 1st ed, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Vlyssides A., Mai S., Barampouti E.M., Moutsatsou A. (2007). "Thermal processing of sewage sludge from Psittalia Greece ", 3rd International Symposium Sustainability in Cement and Concrete, 21-23 May 2007, Istanbul, Turkey.
- Wang, Y., Yan, L. (2009). 'CFD based combustion model for sewage sludge gasification in a fluidized bed' *Frontiers of Chemical Engineering in China* 3(2): 138-145.
- Wender, I. (1996). "Reactions of synthesis gas, *Fuel Processing Technology*", 48, pp 189-297.
- Werther J., Ogada T. (1999). "Sewage sludge combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*. 25, no. 1, pp. 55–116.

Διαδικτυακοί Τόποι

<http://web.deu.edu.tr>

<http://mesogeos.gr/>

<http://library.tee.gr/>

<http://koutsoukos-athanasios.gr/>

<http://www.cleansmart.cn/>

http://energywaste.gr/pdf/21-noemvriou-2014/kalogirou_energy%20waste_2014.pdf

<http://www.greendot.com.cy>

<http://www.westinghouse-plasma.com>[10.3.2016]

<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/index.html>

<http://www.teamenergy.gr/>

http://www.mpshq.com/products/igcc/demo_plant.html [12.3.2016]

<http://eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php>

<http://www.ge-energy.com/>

<https://powergen.gepower>

http://www.cres.gr/kape/education/CHP_gr.pdf

htt: <https://Stirling engines 2014>

<https://www.ge.com/>

http://library.tee.gr/digital/kma/kma_m1431/kma_m1431_siskos (2014)

<http://www.energy.siemens.com>

http://www.ducente.se/images/content/pdf/stanford_20040427

<http://www.terutalk.com/pdf/2012-EPA-ETV-Gasifiers.pdf>

<http://www.therma-flite.com/bioscru.php>